

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

**Sección Departamental de Arquitectura de Computadores y
Automática (Arquitectura y Tecnología de Computadores e Ingeniería
de Sistemas y Automática)**



**DIRECCIÓN DE PLANOS EN RUEDAS DE TREN
POR ANÁLISIS ULTRASÓNICO DEL CONTACTO
RUEDA-CARRIL EN CONDICIONES DINÁMICAS.**

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR

PRESENTADA POR

José David Brizuela

Bajo la dirección de los doctores

Carlos Fritsch Yusta
Alberto Ibáñez Rodríguez

Madrid, 2011

ISBN: 978-84-694-2445-2

© José David Brizuela, 2010

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

DEPARTAMENTO DE ARQUITECTURA DE COMPUTADORES Y AUTOMÁTICA



TESIS DOCTORAL

**DETECCIÓN DE PLANOS EN RUEDAS DE
TREN POR ANÁLISIS ULTRASÓNICO DEL
CONTACTO RUEDA-CARRIL EN
CONDICIONES DINÁMICAS**

Jose David Brizuela

Ingeniero en Electrónica

2010

Contacto: brizuela@iai.csic.es

La Poveda, Arganda del Rey,
28500, Madrid, Spain.

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS
DEPARTAMENTO DE ARQUITECTURA DE COMPUTADORES Y AUTOMÁTICA

TESIS DOCTORAL

**DETECCIÓN DE PLANOS EN RUEDAS
DE TREN POR ANÁLISIS
ULTRASÓNICO DEL CONTACTO
RUEDA-CARRIL EN CONDICIONES
DINÁMICAS**

Autor: Ing. Jose David Brizuela
Directores: Dr. Carlos Fritsch Yusta
Dr. Alberto Ibáñez Rodríguez
Tutor: Dra. Matilde Santos Peñas

Madrid, 2010.



Investigación desarrollada en el marco del proyecto
TRA-2007-67711/AVT y del proyecto D0100SR.
Financiados por:



TESIS DOCTORAL

Título: **Detección de planos en ruedas de tren por análisis ultrasónico del contacto rueda-carril en condiciones dinámicas**

Autor: **Jose David Brizuela**

Directores: **Dr. Carlos Fritsch Yusta**
Dr. Alberto Ibáñez Rodríguez

Tutor: **Dra. Matilde Santos Peñas**

Presentada en la FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS de la UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID, para la obtención del Grado de Doctor en Ciencias Físicas. Ciudad Universitaria (28040) Madrid, ____ de _____ 2010.

Firma del Autor

TRIBUNAL EVALUADOR

Presidente:

Secretario:

Miembro Tribunal 1:

Miembro Tribunal 2:

Miembro Tribunal 3:

CALIFICACIÓN

Fdo. Presidente Tribunal

□

A Roméo y Anne

*... Soy gaucha, y entiendaló
como mi lengua lo explica:
Para mí la tierra es chica
y pudiera ser mayor;
ni la víbora me pica
ni quema mi frente el sol ...*

(José Hernández, "El Gaucho Martín Fierro",
canto I, estrofa 14, 1872.)

Agradecimientos

Deseo agradecer a la empresa Dano-Rail y a la Agencia Estatal CSIC por haber acordado un contrato de investigación que proporcionó el apoyo financiero para realizar esta Tesis Doctoral durante el período 2005-2010.

Quiero dar las gracias en especial a mis directores de tesis: Carlos Fritsch quien me brindó su amistad y apoyo profesional en todo momento, y a Alberto Ibáñez que confió en mi para llevar adelante este proyecto.

A la magnífica gente que compone el grupo de ensayos no destructivos del antiguo Instituto de Automática Industrial por haber formado parte de mi vida tanto profesional como personal durante estos 5 años.

Quiero manifestar mi agradecimiento por el apoyo incondicional recibido por parte de la gente que forma DASEL.

Agradezco y dedico parte de esta tesis a mi madre que ha sufrido mi ausencia durante todo este tiempo y que a pesar de la distancia siempre con su amor estuvo a mi lado. También dedico parte de este trabajo a mi padre que aunque esté ausente su memoria se mantiene viva en mi corazón.

Por último todo este trabajo y esfuerzo que aquí presento es para vos Anne, ya que me has apoyado desde el primer día que comenzamos juntos nuestro camino, me has contenido en momentos malos y buenos, y lo más importante de todo es que hemos formado una hermosa familia junto a Roméo, lo que me hace sentir inmensamente feliz y orgulloso de nuestro amor.

Resumen

La tecnología de transporte ferroviario ha evolucionado en los últimos años de forma considerable. Los trenes de alta velocidad, por ejemplo, representan un importante avance que permiten conectar ciudades a distancias medias en corto tiempo. Pero su operación segura demanda un excelente estado tanto de la infraestructura fija como del material rodante. Uno de los accidentes más graves en trenes de alta velocidad se produjo en Eschede (Alemania) en 1998, provocando más de 100 muertes y numerosos heridos. La causa de este accidente fue una grieta que se propagó en la llanta hasta producir la rotura en servicio de la rueda. A partir de entonces, se prohibió, para trenes de alta velocidad, el uso de ruedas con bandas elásticas que amortiguaban ruidos y vibraciones. Actualmente, tales características han de obtenerse de una excelente calidad de la superficie de rodadura de las ruedas y del carril. En particular, pequeñas irregularidades en estas regiones, pueden provocar grandes fuerzas de impacto debido a las elevadas velocidades de rotación ($\approx 30\text{s}^{-1}$) y traslación de las ruedas ($\approx 100\text{m/s}$).

Los planos se originan al deslizar la rueda cuando la fuerza de tracción o frenado supera a la de rozamiento rueda-carril. Estas situaciones se producen por fallos en el sistema antibloqueo de los frenos, aunque sea durante un corto periodo de tiempo, por la presencia de hojas sobre vías mojadas, por faltas de adherencia por grasa o humedad o, incluso, por un freno bloqueado por congelación al poner el tren en marcha en períodos invernales.

Al formarse un plano por fricción, la temperatura de la superficie de rodadura aumenta rápidamente, pudiendo llegar a producir un cambio de fase en el acero. Como consecuencia, aparecen regiones de alta dureza y fragilidad (martensita), que pueden llegar a desprenderse posteriormente a causa de simples esfuerzos de rodadura, dejando cavidades en la superficie (excoriaciones) o siendo origen de grietas que pueden propagarse.

Un plano recién formado presenta el perfil de una cuerda de circunferencia, pero pronto degenerará en un plano de bordes redondeados y, en un caso extremo de desgaste, en una ovalización local. Cuando el tren circula a una velocidad superior a la crítica (30 - 50Km/h), la presencia de planos (nuevos o degenerados) produce pérdidas del contacto rueda-carril por la inercia de ruedas, suspensión y bogies (la rueda “vuela” sobre el carril). En estas circunstancias la rueda sigue una trayectoria parabólica descendente mientras que el carril, al quedar liberado de la carga, inicia una trayectoria ascendente gobernada por su constante elástica. Cuando rueda y carril se encuentran de nuevo, se produce un fuerte impacto que es varias veces superior a la carga estática. Además de dañar la superficie de rodadura, este impacto es causa de averías en el material rodante (cojinetes, llanta, velo, etc.) y en el fijo (carriles, traviesas, etc.). Por otra parte, la presencia de planos aumenta considerablemente el ruido y las vibraciones y produce cierto incremento del consumo energético.

Por estas razones, la pronta detección de planos y otras irregularidades formadas en la superficie de rodadura es un aspecto de sumo interés para el mantenimiento ferroviario. Una vez detectada una irregularidad crítica y reparable, la rueda es torneada para recuperar el perfil inicial. Los talleres de mantenimiento ferroviario modernos disponen de maquinaria para realizar esta operación con la rueda montada en su eje, reduciendo el tiempo y coste del proceso. Estos aspectos son muy importantes desde el punto de vista operativo, pues se demanda que las tareas de mantenimiento se realicen en corto tiempo con el fin de restablecer rápidamente el servicio.

De este modo, durante los últimos años, se han propuesto y descrito diversas técnicas para detectar diversos defectos en la banda de rodadura, llanta y velo de las ruedas ferroviarias. En particular, destacan aquellas que operan con el tren en movimiento, aunque sea a velocidad lenta. En estos casos, el tiempo de inspección y detección de problemas puede considerarse nulo, si el tren se hace circular por un puesto de medida cuando está entrando en el taller para realizar una operación rutinaria de mantenimiento.

Las técnicas propuestas con esta finalidad han sido variadas y son objeto de estudio en el primer capítulo de este trabajo. En algunos casos se miden las variaciones en la elongación elástica del carril como consecuencia de esfuerzos de carga e impacto (galgas extensiométricas, fibra óptica, etc.). En otros, se utilizan acelerómetros que miden las deformaciones y vibraciones producidas en el rail por irregularidades en la banda de rodadura. Otras técnicas, puramente mecánicas, miden la diferencia de radio entre la pestaña (considerada libre de desgaste y deformaciones) y la superficie de rodadura. Asimismo, se han propuesto técnicas ópticas

que evalúan las diferencias entre estos radios y/o miden el perfil de la superficie de rodadura en dirección axial. Finalmente, es común utilizar tecnologías ultrasónicas para detectar defectos, tanto en la superficie de rodadura como en el interior de la rueda (llanta, velo y cubo).

Con estas técnicas se detecta una diversidad de defectos en ruedas y operan con el tren en movimiento. Sin embargo, sólo algunas de ellas detectan la presencia de planos por medios directos (variaciones de radio) o indirectos (vibraciones, impactos). Las técnicas de medida directa permiten conocer la dimensión de los defectos, al menos con cierta resolución. Las de medida indirecta pueden dar valores cuantitativos de los efectos que producen (cargas de impacto), pero no de su extensión. Los métodos de inspección ultrasónicos conocidos no son adecuados para la detección de planos y ovalizaciones.

En esta Tesis se aborda el problema de la detección de planos y otras irregularidades en la banda de rodadura mediante ultrasonidos con una técnica innovadora, que permite su dimensionamiento con alta resolución y con el tren en marcha. A diferencia de otras aproximaciones en las que una onda ultrasónica superficial explora la banda de rodadura de la rueda, que no pueden detectar planos, en este caso la onda ultrasónica se envía por un carril de medida, analizando los tiempos de vuelo desde el transductor al punto de contacto rueda-carril en condiciones dinámicas. Hasta el inicio del trabajo de investigación abordado en esta Tesis Doctoral, no se ha descrito ningún sistema ultrasónico que utilice esta técnica para detectar y evaluar planos en ruedas con el tren en movimiento.

La idea que dio origen a este trabajo de investigación fue aprovechar el propio movimiento del tren sobre el carril para detectar irregularidades en la banda de rodadura. Esta metodología supone un cambio de concepto en el ámbito de la Evaluación No Destructiva (END) por ultrasonidos donde, convencionalmente, se considera que los defectos a detectar son estáticos respecto a la posición del transductor.

En una primera aproximación, que dio lugar al trabajo de investigación tutelado, se abordó el problema mediante el análisis del efecto Doppler inducido en el eco del contacto rueda-carril por el movimiento de la rueda. A velocidad de desplazamiento constante del tren y con una rueda perfectamente circular, la frecuencia de desplazamiento Doppler es constante. Cuando existen irregularidades en la banda de rodadura, la velocidad del punto de contacto rueda-carril sufre variaciones que alteran la frecuencia de desplazamiento Doppler. Los resultados de este trabajo permitieron concluir que la técnica detectaba la presencia de planos, pero no era adecuada para estimar su dimensión.

Como consecuencia, se partió del mismo principio de operación (enviar una onda superficial por el carril de medida) pero, en este caso, utilizando onda pulsada, detectar el eco producido por el contacto rueda-carril, y analizar en disparos consecutivos el tiempo de vuelo. Cuando la rueda es perfectamente circular y el tren se mueve a velocidad constante, los incrementos de tiempo de vuelo del pulso ultrasónico en ida y vuelta se mantienen constantes en disparos consecutivos. Cuando la rueda se apoya sobre una irregularidad, los incrementos en los tiempos de vuelo mostrarán variaciones alrededor de esta constante, permitiendo su detección.

La evaluación del tamaño (longitud) de los defectos (planos, coqueras, etc.) se puede realizar con esta nueva metodología midiendo el intervalo espacial en el que se producen variaciones en la pendiente de la recta desplazamiento-tiempo nominal. Pero, además, se ha encontrado un método muy robusto que permite determinar la pérdida de material sufrida por abrasión en el momento en que se formó el plano: el teorema de la pérdida de radio, una de las aportaciones claves de esta Tesis Doctoral. De este valor se deduce fácilmente la longitud del plano inicial y, por consiguiente, una estimación de la gravedad del daño. El método posee una elevada inmunidad al ruido e independencia del nivel de desgaste de la rueda y del plano original.

Por otra parte, el requisito de considerar constante la velocidad de desplazamiento del tren puede relajarse en buena parte al poder medirla con precisión, incluyéndola en los cálculos de evaluación del tamaño de los defectos. Únicamente se requiere que el cambio de velocidad experimentado por el tren entre cierto número de disparos consecutivos (algunos milisegundos) sea insignificante en relación a la velocidad media de desplazamiento. Este requisito se cumple fácilmente dada la gran inercia de un tren (baja aceleración) y a un pequeño periodo de tiempo entre disparos (del orden de 1ms).

La técnica propuesta presenta numerosas ventajas: se basa en una idea sencilla y fiable, adaptada al medio ferroviario (robustez, ausencia de partes móviles, en gran medida inmune a la suciedad y condiciones atmosféricas, etc.), bajo coste (un único transductor y sistema de adquisición por tramo de carril de medida), rápida (tren en movimiento) e innovadora (no presenta conflictos con patentes o publicaciones anteriores).

Sin embargo, como se describe en esta memoria, las condiciones de operación se alejan de la situación ideal, lo que ha exigido un esfuerzo adicional para encontrar soluciones a diversos problemas. Entre ellos, los más importantes son la debilidad del eco de contacto rueda-carril, el ruido estructural, múltiples modos de propagación de ondas guiadas en el interior del carril de medida y el algoritmo automático de seguimiento y detección de defectos en la banda de

rodadura.

Ha sido necesario abordar el desarrollo de técnicas auxiliares que permitan discriminar con precisión los ecos de contacto. Estas técnicas afectan al diseño del transductor, a la electrónica que realiza la adquisición de señal y a los algoritmos desarrollados para evaluar y cuantificar los defectos.

La memoria de la Tesis Doctoral se estructura de la siguiente forma:

- ✧ *El Capítulo 1 hace una revisión de los defectos en ruedas ferroviarias, con especial atención a los planos y efectos que producen, así como de las técnicas conocidas para su detección y cuantificación.*
- ✧ *El Capítulo 2 presenta las bases teóricas de la técnica propuesta. Propone un modelo de evolución de un plano nuevo y la respuesta que cabe esperar en condiciones cinemáticas en cualquier estado de desgaste. Este análisis permite determinar los límites de aplicabilidad y resolución de la nueva técnica.*
- ✧ *El Capítulo 3 aborda el diseño del sistema de inspección proponiendo diversas técnicas para operar en condiciones no ideales, con ruido estructural y ecos débiles.*
- ✧ *El Capítulo 4 expone el entorno experimental desarrollado, presentando los resultados obtenidos en condiciones reales.*
- ✧ *Finalmente, el Capítulo 5 se dedica a realizar una discusión general de la metodología y sus posibles variantes, extrayendo las conclusiones finales y presentando una proyección futura del trabajo.*

Abstract

Over the last years, the railway technology has considerably evolved. High-speed trains, for example, represent a major mark for interconnecting middle-distance cities in a short time. However its secured operations require excellent conditions of infrastructure and rolling stock. One of the most serious high-speed train accidents occurred on Eschede (Germany) in 1998, causing over 100 deaths and many injured. A single fatigue crack in one wheel caused the train to derail, when it eventually failed. Thereafter, the use of a rubber damping ring that reduced noise and vibration was forbidden in high-speed trains. Nowadays, such features have to be obtained from an excellent rolling surface quality of wheels and rails. Small irregularities on the tread can cause large impact forces due to high speeds rotation ($\approx 30s^{-1}$) and translational motion of the wheels ($\approx 100m/s$).

Wheel flats are originated by sliding the wheel when traction or braking force exceeds the wheel-rail friction force. These situations can take place when the anti-lock braking system fails even for a short period of time, or under low adhesion conditions due to leaves, oil, greasy rail, or, even more, frozen brakes that can lock wheels during the wintertime.

When a flat is formed, the temperature of the tread increases rapidly and can lead to a phase change in the steel. Consequently areas of high hardness and brittleness appear (martensite) and are likely to come off later under loading cycles, leaving cavities on the surface or being the origin of cracks that can propagate into the wheel.

A fresh flat can be described as a circle chord which will shortly degenerate into a rounded flat with smooth edges and, in an extreme case of worn, it will turn into an out-of-round wheel. When the train runs up to a critical speed (30-50 Km/h), and when flats (new or degenerated) are formed in the rolling surface, losses of rail-wheel contact occur because of the inertia of wheels and the suspension system. In these circumstances, the wheel follows a descendent parabolic

trajectory while the load-free rail initiates an ascendent path that it is governed by its elastic constant. When wheel and rail meet again, a high impact force is produced which is many times greater than the static load, damaging the rolling stock (bearings, axles, wheels, etc.) as well as the infrastructure (rails, sleepers, etc.). On the other hand, not only noise and vibrations are considerably increased by flats but also energy consumption becomes higher.

For these reasons, an early detection of flats and other irregularities which might have been formed on the wheel tread is very important. Once irregularities have been reported, if they are severe and repairable, the wheel have to be machined to recover its initial profile. Modern equipments for turning the wheel mounted on the axles have been installed in railway maintenance workshops in order to reduce time and cost. From an operational point of view, these features are very significant, since it is required that maintenance tasks must be performed in a short time to restore service as soon as possible.

Thus, in recent years several techniques have been proposed and described to detect all sort of defects formed on tread, rim and web of railroad wheels. Those which operate with trains moving at low speed are particularly emphasized. In these cases, for instance, the check time and detection problems can be considered null if the inspection is performed while the train is entering into the maintenance workshops.

Several techniques which have been developed for this purpose are discussed in the first chapter of this thesis. In some cases, vertical deflections of the rail during the passage of trains is measured by using strain gauges, fiber optics sensors, etc. In others, deformations and vibrations of the rail caused by wheel tread irregularities are detected by accelerometers. Other techniques measure the dimensional difference between the flange (considered out-of-wear and deformation) and the rolling surface by mechanical methods. Moreover, optical techniques are proposed to measure and evaluate wheel tread profiles. Finally, it is common to use ultrasonic technologies to find out defects over the rolling surface and inside of the wheels (flange, rim, web and hub).

A variety of wheel defects can be detected by applying different inspection techniques while the train is in motion. However, flats can only be detected by a few of them using direct (radius variations) or indirect (vibration, impact) measurements. The defects size can be obtained with certain resolution by using direct measurements techniques. Indirect measurements cannot gauge defects, they just provide quantitative values related to their effects (impact loads). On the other hand, currently available ultrasonic inspection methods are not suitable for detecting

flats and out-of-round wheels.

An innovative ultrasonic technique that allows sizing defects in the tread with high-resolution while the train is in motion is proposed in this thesis, aiming to deal with issues of detecting flats and other irregularities. It differs from other approaches where an ultrasonic surface wave explores the wheel tread, which does not allow the detection of flats. In this case, the ultrasonic wave is sent over a measuring rail and the round-trip time-of-flight from the transducer to the rail-wheel contact point is analyzed in dynamic conditions. Until the beginning of the research work developed in this thesis, it has not been reported any ultrasonic system for detecting and evaluating wheel-flats with the train moving.

The idea that led to this research was to exploit the movement of the train over the rail in order to detect irregularities in the tread. The methodology involves a change of concept in Non Destructive Evaluation (NDE) by Ultrasound, where flaws are considered as static reflectors.

A first approach for detecting flats was carried out by analyzing the Doppler effect induced in the rail-wheel contact point echo by the wheel movement using continuous waves. If the train moves at constant speed with a perfectly circular wheel, the Doppler frequency remains constant. Nevertheless, if there are any irregularity in the tread, the rail-wheel contact velocity will be modified as well as the Doppler frequency shift. The results obtained from this technique allowed to conclude that it is suitable for flat detection but not for quantitative measurement.

As a consequence, using the same principle of operation (sending a surface wave over a measuring rail) but, in this case, pulsed-waves, the rail-wheel contact point echo is detected and analyzed in consecutive pulses. The increments in the round-trip time-of-flight in consecutive pulses remain constant if the wheel is perfectly round and the train moves at constant speed. The variations in the round-trip time-of-flight will show changes around the mean value when the wheel rolls over a defect, allowing its detection.

The proposed method also provides a quantitative measurement of the defects size (flats, spalling, shellings, etc.). This is achieved by measuring the spatial range in which the nominal time-displacement slope has changed. Moreover, a theorem has been formulated in order to determine the material loss caused by abrasion during which the flat was formed. Its implementation yields a very robust method, for flat detection and measurement, being an important contribution of this thesis. The original flat length can be easily estimated by applying the theorem result, so it is possible to find out the damage level. The method has a high noise rejection and it is independent from the wear level of wheels and flats.

On the other hand as the method provides an accurate train speed measurement, it can be included in the computation for evaluating the defects size. The only requirement that the train acceleration be low during the measurement process, is easily satisfied due to the large train inertia and the short pulse repetition interval (about 1ms).

The proposed technique based on a simple and reliable idea has many advantages: it is well adapted to the railway environment (robustness, no moving parts required, independent of weather conditions, not affected by the state of wheels, etc.), it is a low cost system (just a single transducer and an acquisition system are required for each measuring rail), the inspection is performed while the train is in motion, and, finally, it is an innovative method (no conflicts with previous patents or publications).

However, as it is described in this work, the operating conditions are far away from the ideal situation, requiring special efforts to find out solutions to diverse problems. The most important among them are: the weak rail-wheel contact echo, the structural noise, the multiple guided wave modes of propagation inside the measuring rail, the automatic tracking algorithm and the detection of defects in the tread.

Auxiliary techniques have been developed to discriminate the contact echoes with a good signal-to-noise ratio. These techniques involve the designs of transducer, the acquisition system and algorithms for performing the evaluation and quantification of defects.

This Ph. D. Thesis is structured as follows:

- ✧ Chapter 1 is devoted to revise the most common flaws in railway wheels, giving special attention to flats and their effects, as well as to the known techniques for their detection and quantification.*
- ✧ Chapter 2 presents the theoretical basis of the proposed technique. From a model of the evolution followed by new formed flat, the response in kinematic conditions is studied. This analysis provides the resolution and applicability limits of the new technique.*
- ✧ Chapter 3 deals with the inspection system design, proposing different techniques to operate in non-ideal conditions, with structural noise and weak echoes.*
- ✧ Chapter 4 describes the experimental arrangement, showing and discussing the obtained results in real conditions.*

✧ *Finally, Chapter 5 provides a general discussion of the methodology and their variants, extracting conclusions and foreseen future work.*

□

Índice

Índice de contenidos	XXIII
Índice de Tablas	XXVII
Índice de Figuras	XXVIII
1. Defectos en ruedas y técnicas de detección y medida	7
1.1. Ruedas ferroviarias	7
1.2. Importancia económica del mantenimiento de ruedas	9
1.2.1. Mantenimiento periódico de ruedas	9
1.3. El contacto rueda-carril	10
1.4. Defectos en las ruedas	12
1.4.1. Defectos por fatiga de contacto	14
1.4.2. Grietas de origen térmico	16
1.4.3. Planos en ruedas ferroviarias	18
1.4.4. Ovalidad de la rueda	20
1.5. Métodos de inspección	22
1.5.1. Detección de defectos por medición de cargas e impactos	23
1.5.2. Medida de variaciones del radio de la rueda	27

1.5.3.	Técnicas ultrasónicas	31
1.5.4.	Detección ultrasónica de defectos en ruedas de tren	35
1.6.	Discusión y conclusiones	41
2.	Una nueva técnica dinámica de detección y medida de planos en ruedas	43
2.1.	Descripción de la técnica	43
2.2.	Evolución de un plano	45
2.2.1.	Condiciones de estabilidad del perfil	46
2.3.	Proceso de medida	47
2.3.1.	Relación con la pérdida de radio	50
2.4.	Geometría de un plano en diferentes etapas	59
2.4.1.	Cinemática del contacto rueda-carril	64
2.5.	Técnicas de medida	71
2.5.1.	Detección de planos mediante el efecto Doppler	72
2.5.2.	Técnica de pulso-eco para la detección de planos	73
2.6.	Elección de la ventana de integración	80
2.6.1.	Coherencia de las medidas para planos simples	81
2.6.2.	Medidas con múltiples planos	83
2.7.	Medidas en condiciones reales: Ruido estructural	87
2.8.	Discusión y conclusiones	90
3.	Procedimiento de medida	93
3.1.	Parámetros de diseño del sistema de medida	94
3.1.1.	Longitud del carril de medida	94
3.1.2.	Periodo de repetición de pulsos T_{PRF} y errores de discretización	96
3.1.3.	Frecuencia de señal ultrasónica	102

3.1.4.	Ancho de banda de los datos	103
3.1.5.	Seguimiento del eco de contacto	105
3.1.6.	Cancelación de ruido estructural	109
3.1.7.	Detección del eco de contacto	113
3.2.	Discusión y conclusiones	114
4.	Mediciones, Experimentos Realizados	
	Evaluación del Sistema	117
4.1.	Prototipo de laboratorio	118
4.2.	Generación de ondas de Rayleigh	118
4.2.1.	Carril de medición	124
4.2.2.	Ruedas	127
4.3.	Mediciones de perfil	128
4.3.1.	Sistema de medición de perfil	128
4.4.	Sistema de ultrasonidos	131
4.4.1.	Funcionamiento de la lógica de control	133
4.4.2.	Verificación del algoritmo de seguimiento	134
4.5.	Evaluación de defectos	136
4.5.1.	Ensayos <i>Rueda 1</i>	138
4.5.2.	Ensayos <i>Rueda 2</i>	144
4.5.3.	Análisis de resultados	146
4.5.4.	Efectos de la velocidad en las estimaciones	150
4.5.5.	Consideraciones importantes	153
4.6.	Discusión y conclusiones	156
5.	Conclusiones	159

5.1. Trabajo Futuro	163
Bibliografía	165

Índice de tablas

1.1. Clasificación de defectos y dimensiones críticas.	14
2.1. Evaluación de 3 planos próximos.	86
4.1. Parámetros de excitación del transductor.	121
4.2. Dimensiones de los defectos mecanizados.	131
4.3. Parámetros usados para verificar el seguimiento.	134
4.4. Parámetros empleados en los ensayos de laboratorio.	136
4.5. Resumen de los ensayos ubicando los defectos en diferentes posiciones.	149
4.6. Resumen de las inspecciones a diferentes velocidades.	153

Índice de figuras

1.	Componentes básicos de un bogie.	4
2.	Partes de una rueda ferroviaria.	5
1.1.	Desgaste en la banda de rodadura.	13
1.2.	Defectos en ruedas: exfoliación.	15
1.3.	Defectos en ruedas: escoriación.	17
1.4.	Defectos en ruedas: plano.	18
1.5.	Ovalidad - OOR	21
1.6.	Detector de impacto de carga <i>WILD</i>	24
1.7.	Sistema óptico de detección de planos.	28
1.8.	Sistema de inspección óptica <i>TreadVIEWTM</i>	31
1.9.	Sistema de detección DSR	37
1.10.	Sistema de inspección de ruedas por ultrasonidos.	38
2.1.	Evolución de un plano.	45
2.2.	Representación geométrica de una rueda con un plano degenerado.	48

2.3. Representación de una rueda girada sobre un plano degenerado.	49
2.4. Representación de los sistemas de referencias intervinientes en el sistema de medición.	52
2.5. Representación del proceso de medida.	58
2.6. Geometría de un plano nuevo.	59
2.7. Comparación del perfil de la geometría circular, plano nuevo y degenerado. . .	61
2.8. Comparación entre el radio de un plano original y el de uno degenerado. . . .	63
2.9. Movimiento de la rueda al rodar sobre un plano.	65
2.10. Curvas de desplazamiento $s_{(\varphi)}$ y del movimiento vertical $h_{(\varphi)}$ en un plano ideal.	67
2.11. Desplazamiento s en función de θ y de φ	69
2.12. Desplazamiento $s_{(\varphi)}$ para diferentes niveles de desgaste.	70
2.13. Representación de la función $s(\varphi)$ en planos de la <i>Etapa II</i>	71
2.14. Movimiento de la rueda sobre el carril de medida.	73
2.15. Representación gráfica para la obtención de la secuencia d_k	77
2.16. Simulación del proceso de medida.	79
2.17. Simulación del proceso de medida con señal ruidosa.	80
2.18. Simulaciones del proceso de medida y estimación del defecto en función de la ventana de integración.	82
2.19. Simulación de medidas con planos múltiples.	84
2.20. Simulación de medidas ruidosas con planos múltiples.	85
2.21. Simulación de las estimaciones de d_e y L_e con planos múltiples.	86

2.22. Reflectividad de los dispersores en un fragmento del carril de medida.	88
2.23. Simulación del pulso ultrasónico emitido y de la señal recibida.	89
3.1. Diferentes formas de realizar la instalación.	95
3.2. Representación de $s(x)$ y $ s(\varphi) $ en planos recién formados.	98
3.3. Ejemplo de adquisición de $ s $ con M par.	98
3.4. Ejemplo de adquisición de $ s $ con M impar.	100
3.5. Errores relativos en las estimaciones de d y L en función de M	101
3.6. Adquisición de la longitud del carril	105
3.7. Diagrama temporal del seguimiento del eco de contacto.	106
3.8. Adquisición de trazas con tiempo de retardo fijo.	109
3.9. Alineamiento de trazas para obtener la traza diferencial.	111
3.10. Cancelación de ruido estructural.	112
4.1. Diagrama del prototipo construido en el laboratorio.	119
4.2. Transductor diseñado para el prototipo de laboratorio	120
4.3. Resultados de ensayos utilizando diferentes frecuencias de emisión.	123
4.4. Ensayos sobre diferentes carriles de inspección.	125
4.5. Esquema del carril de inspección.	126
4.6. Imagen de las ruedas de ensayo.	127
4.7. Sistema de medición manual de perfil.	129
4.8. Defectos mecanizados para pruebas en laboratorio.	130

4.9. Diagrama en bloques del sistema de ultrasonidos.	131
4.10. Diagrama de flujo del funcionamiento del sistema de control.	133
4.11. Verificación del algoritmo de seguimiento.	135
4.12. Test con Rueda 1. Defecto a 500mm del transductor.	139
4.13. Test con Rueda 1. Defecto a 1000mm del transductor.	141
4.14. Test con Rueda 1. Defecto a 2000mm del transductor.	143
4.15. Test con Rueda 2. Defecto a 700mm del transductor.	145
4.16. Test con Rueda 2. Defecto a 900mm del transductor.	147
4.17. Test con Rueda 2. Defecto a 1300mm del transductor.	148
4.18. L en función de la pérdida de material d	150
4.19. Influencia de la velocidad en las estimaciones de d_e	151
4.20. Elección del filtro de procesamiento y respuesta en frecuencia.	154
4.21. Efectos de la pérdida de señal.	155

Simbología

Símbolos

Listado de símbolos que se utilizan en este documento:

Símbolos					
Nombre	Significado	Unidad	Nombre	Significado	Unidad
E	Módulo de Young	GPa	ρ	Densidad	Kg/m ³
ν	Coefficiente de Poisson	—	λ	Longitud de onda emitida	[m]
c	Velocidad de propagación de las ondas superficiales o de Rayleigh	[m/s]	c_L	Velocidad de propagación de ondas longitudinales	[m/s]
c_T	Velocidad de propagación de ondas transversales	[m/s]	c_{Lamb}	Velocidad de propagación de las ondas de Lamb	[m/s]
T_W	Tiempo de adquisición o duración de la ventana de captura de datos	[s]	ϕ	Coefficiente de atenuación	[Nepers/m]
b_w	Ancho de banda relativo de la frecuencia emitida por el transductor	[%]	f_S	Frecuencia de muestreo de datos	[Hz]
f_E	Frecuencia central de emisión	[Hz]	f_R	Frecuencia recibida por el transductor con componente Doppler	[Hz]
f_D	Desplazamiento de frecuencia por efecto Doppler	[Hz]	L_C	Longitud del carril de inspección	[m]
L_B	Longitud entre ejes de un bogie (batalla o empate)	[m]	L_R	Longitud del desarrollo de una rueda ferroviaria	[m]
d	Profundidad de defecto, pérdida de radio o flecha	[m]	R	Radio nominal de la rueda ferroviaria	[m]
P	Notación de la proyección del centro de la rueda sobre el carril	—	Q	Notación para el punto de contacto rueda-carril	—
φ	Ángulo de giro de la rueda sobre el punto de contacto	[rad, °]	θ	Variable de coordenadas polares	[rad, °]
θ_0	Ángulo definido entre un plano nuevo y el centro de la rueda	[rad, °]	θ_H	Ángulo definido entre plano degenerado y el centro de la rueda	[rad, °]
\vec{R}	Función radio vector	—	r	Función que describe el radio de la rueda	—
r_C	Función del radio en zona circular	—	r_P	Función que describe el radio en zonas planas nuevas	—

<i>Nombre</i>	<i>Significado</i>	<i>Unidad</i>	<i>Nombre</i>	<i>Significado</i>	<i>Unidad</i>
r_H	Función para describir el radio en la zonas desgastadas	—	ξ	Factor de desgaste	—
η	Fracción de pérdida de radio	—	\vec{t}	Vector tangente unitario	—
s	Función de desplazamiento relativo entre los puntos P y Q	—	L	Longitud del plano inicial	[m]
L_e	Longitud del plano inicial estimado	[m]	L_H	Longitud del plano degenerado	[m]
v	Velocidad de desplazamiento del tren sobre el carril de inspección	[m/s]	x_Q	Posición del punto de contacto sobre el carril	[m]
x_P	Posición de la proyección del centro de la rueda sobre el carril	[m]	T_Q	Tiempo en ida y vuelta del pulso de interrogación	[s]
ΔT_Q	Incremento entre dos tiempos de vuelo consecutivos	[s]	T	Tiempo de retardo computado por el algoritmo de seguimiento	[s]
ΔT	Incremento en el tiempo de retardo entre dos disparos consecutivos	[s]	T_v	Tiempo del origen de la ventana de captura al valor máximo	[s]
T_E	Tiempo desde el valor máximo al centro de la ventana de adquisición	[s]	v_Q	Velocidad instantánea del punto de contacto	[m/s]
Δx	Secuencia resultante de aplicar el teorema de pérdida de radio	[m]	a	A-scan capturado	—
S	Señal de información contenida en el a-scan capturado	—	r	Componente de ruido contenida en el a-scan	—
d	Traza diferencial	—	N	Número de muestras que contiene un a-scan	—
A_U	Umbral de detección de señal	—	A_m	Máximo valor dentro de un a-scan	—
P_m	Posición del valor máximo dentro de un a-scan	—	d_k	Intervalo espacial de muestreo del carril de medición	[m]
\hat{d}_P	Valor máximo de la secuencia de datos d_k	[m]	\hat{d}_N	Valor mínimo de la secuencia de datos d_k	[m]
d_e	Pérdida de radio estimada	[m]	w	Ventana de integración para el teorema de pérdida de radio	—
M	Cantidad de muestras de la ventana w	—	M_x	Longitud de la ventana de integración w	[m]
T_{PRF}	Período de repetición de pulsos	[s]	ω	Velocidad angular de la rueda a inspeccionar	[rad ⁻¹]
A	Área encerrada bajo la curva s .	[m ²]	a	Fase de muestreo arbitraria	—
ε	Error relativo	%	B	Ancho de banda de datos a transferir	[bit/s]
b	Número de bits para representar una muestra de adquirida	—	κ	Constante de proporcionalidad	[m/s ²]

Acrónimos

AAR: Association of American Railroads.

ABS: Anti-lock Braking System.

ASIC: Application-Specific Integrated Circuit.

AVE: Alta Velocidad Española.

AWIS: Automatic Wheel Inspection System.

BSNF: Burlington Northern Santa Fe Railway.

CAD: Compensación de la Atenuación con la Distancia.

CCD: Charge Coupled Device.

CIR: Centro Instantáneo de Rotación.

CSIC: Consejo Superior de Investigaciones Científicas.

DB: Deutsche Bahn.

DSR: Defectos Superficiales de la Rodadura.

EMAT: Electro-Magnetic Acoustic Transducer.

EMFI: Electro-Mechanical Film.

EMI: Electro-Magnetic Interference.

END: Evaluación No Destructiva.

FBG: Fiber Bragg Grating.

FPGA: Field Programmable Gate Array.

IAI: Instituto de Automática Industrial.

ICE: Intercity Express.

LAHUT: Laser-Air Hibrid Ultrasound Transducer.

MATTILD: Main Line and Transit Impact Load Detector.

MEMS: Micro Electro-Mechanical Systems.

NCP: Nominal Contact Point.

OOR: Out-of-Round.

PRF: Frecuencia de repetición de pulso.

PVDF: Polyvinylidene Difluoride.

PZT: Titanato-Circonato de Plomo.

RCF: Rolling Conctact Fatigue.

RSSB: Rail Safety & Standards Board.

SSP: Split-Spectrum Processing.

TAV: Treno Alta Velocità.

UIC: Union Internationale des Chemins de Fer.

US: Ultrasonidos.

USB: Universal Serial Bus.

UFPE: Underfloor Testing System.

WILD: Wheel Impact Load Detector.

WSP: Wheel Slide Protection.

Antecedentes

Generalmente se considera que el tren es una de las formas de transporte más segura. En realidad esto es así, siempre que se mantengan ciertos estándares de calidad y un cuidado mantenimiento de vías y trenes. Hasta fechas relativamente recientes, se consideraba que el desgaste sufrido por las ruedas, no siempre uniforme, era uno de los principales factores a considerar para un correcto mantenimiento preventivo.

En la actualidad, con la mejora en los materiales, diseño de ruedas, suspensión y comportamiento dinámico de los trenes, el desgaste del material rodante y carriles es mucho menor, aumentando su vida útil. Pero, al mismo tiempo, han aumentado la velocidad y carga por eje, así como las tasas de aceleración y frenado, tanto en transporte de pasajeros (trenes de alta velocidad y de cercanías) como de mercancías. Las mayores demandas mecánicas producen mayores esfuerzos en el contacto entre rueda y carril, produciendo efectos de fatiga con una mayor incidencia en la seguridad y coste de operación que el propio desgaste natural [Ekberg y Marais, 2000].

Los fallos por fatiga suelen ser mucho más catastróficos que los debidos al mero desgaste: parte de la rueda se puede desprender, dañando el carril y, eventualmente, produciendo una rotura total y el descarrilamiento del tren. El análisis del accidente del tren de alta velocidad en Eschede (Alemania) el 3 de Junio de 1998, dio como causa primaria la delaminación de la llanta provocada por grietas debidas a fatiga de contacto y un excesivo desgaste en ruedas con banda elástica [NASA, 2007]. Poco tiempo después, en Agosto del mismo año, en China, un tren de carga sufrió un descarrilamiento. Las causas de este accidente también fueron atribuidas a grietas desarrolladas por fatiga de contacto [Fan y Jia, 2008].

Desde entonces, las administraciones nacionales de ferrocarriles exigen unos mayores niveles de mantenimiento preventivo que van más allá del reperfilado de ruedas para compensar el desgaste. En la actualidad, es necesario determinar la presencia de grietas, planos, exfoliaciones, coqueas y ovalización, manteniendo el perfil de la rueda dentro de estrechos márgenes de tolerancia. Esta exigencia es compartida tanto por los operadores de los trenes como por los propietarios de las vías. En los casos en que se produce algún defecto crítico, la rueda debe repararse mediante torneado (re-perfilado) o ser retirada del servicio.

Además de obtener unos elevados estándares de seguridad y confort en la circulación, el mantenimiento preventivo del estado de las ruedas contribuye a reducir los costes de operación. Ayuda a conservar en buen estado tanto el material rodante (rodamientos, ejes, etc.) como las infraestructuras fijas (vías, agujas, etc.). Las tareas de mantenimiento pueden ser programadas, evitando averías inesperadas. Se reducen los costes de inventario de repuestos y los riesgos para los operarios al tratarse de operaciones rutinarias. La utilización de registros históricos facilita el análisis y diagnóstico de las averías y ayuda al diseño de elementos más seguros y duraderos. Prevenir los defectos que afectan la superficie de rodadura también reduce el consumo energético. Se ha estimado que un plano de 40mm de largo produce una disipación próxima a los 20HP por rueda, en carril y vehículo [Ackerman, 1987].

La fuerte exigencia por parte de las administraciones públicas a las compañías ferroviarias en el cumplimiento de normas de seguridad es uno de los motivos que han conducido al desarrollo de sistemas automáticos de inspección del material rodante ferroviario.

Pero, por otra parte, los operadores demandan que el proceso de mantenimiento sea rápido para devolver el tren lo más pronto posible al servicio. Idealmente, la detección de fallos o variables fuera de tolerancia, debería realizarse en un tiempo nulo y de forma automática.

Esto puede conseguirse si el proceso de inspección se realiza con el tren en movimiento, por ejemplo, a la entrada del taller para una operación de mantenimiento rutinaria. Al ser las inspecciones automáticas y de bajo coste (exceptuando la inversión en los equipos de medida), pueden realizarse con mucha frecuencia, lo que redundará en mayores niveles de seguridad y control de la evolución de defectos no críticos.

El control de los defectos superficiales y, particularmente de grietas y planos, ha sido objeto de numerosos trabajos de investigación y algunas realizaciones, que son revisadas en el Capítulo 1. También se incluyen, por su relevancia, algunas realizaciones que inspeccionan el interior de la rueda (fundamentalmente velo y llanta) y otras utilizadas para la validación de ruedas inmediatamente después de su fabricación.

Antecedentes particulares de este trabajo

En Febrero de 2005 la empresa [Dano-Rail](#), del grupo Danobat (Guipúzcoa), solicitó a nuestro grupo de investigación en el Instituto de Automática Industrial del [CSIC](#), la elaboración de un ante-proyecto para la detección de planos y otros defectos superficiales en las ruedas de trenes. Los requisitos previos fueron:

- ✧ El proceso de inspección debería ser automático, esto es, realizarse con el tren en marcha lenta, en una instalación inmediata a la entrada a los talleres.

- ✧ Debía ser fiable y, particularmente para la detección de planos, debería cuantificar su dimensión.
- ✧ El sistema habría de ser original, evitando colisiones con patentes de otras compañías y otras realizaciones prácticas.

En Abril de ese mismo año nuestro grupo presentó a Dano-Rail una propuesta de proyecto de investigación que cumplía los anteriores requisitos. El proyecto se calificó de alto riesgo ya que no existían antecedentes sobre la metodología que se propuso.

A diferencia de otras prácticas en las que, para detectar planos, se miden variaciones en la altura de la pestaña (considerada de diámetro constante), o se usan acelerómetros o galgas extensiométricas para estimar la carga instantánea sobre un carril instrumentado, se propuso una técnica de medida basada en ultrasonidos.

Existen diversas realizaciones (algunas de nuestro grupo), en las que se envía un pulso ultrasónico por la superficie de rodadura, registrándose y analizándose los ecos recibidos. Estos métodos han demostrado su utilidad para detectar grietas, coqueras y otros daños que modifican severamente la geometría superficie de rodadura. Sin embargo, los planos son pequeñas variaciones geométricas, particularmente cuando han degenerado en planos suavizados a consecuencia de las fuerzas de impacto. En estos casos pueden detectarse cambios en el material asociado a planos, pero no identificarse como tales y, menos aún, medirlos.

La alternativa que se propuso es enviar un pulso ultrasónico por la superficie de un carril de medida y analizar el eco del contacto rueda-carril. Esto es, la detección y medida de los planos y otros defectos superficiales se habría de realizar indirectamente, analizando la interacción entre rueda y carril, siendo este último el portador de la señal de interrogación. Esta metodología es muy innovadora pues no se han propuesto, hasta nuestro conocimiento, técnicas análogas que, además, operen con el tren en movimiento.

Como consecuencia del riesgo asociado a la realización de una alternativa, de la que no existían antecedentes, ese mismo año se firmó un contrato de investigación entre Dano-Rail y el CSIC para un proyecto que analizara su viabilidad.

En Marzo de 2007 concluyó dicho estudio de viabilidad, demostrando que la técnica propuesta permitiría la detección de planos y coqueras. Parte de los resultados de este trabajo de Tesis Doctoral se obtuvieron durante ese periodo, con algunas conclusiones que forman parte del trabajo tutelado (DEA): “Detección de defectos en ruedas ferroviarias empleando el efecto Doppler”, [Brizuela \[2007\]](#).

Un nuevo contrato de investigación entre Dano-Rail y el CSIC, consecuente con los resultados obtenidos en el estudio de viabilidad, posibilitaría la realización de un sistema para operar en condiciones reales. Finalmente, éste ha sido desarrollado sobre la base teórica y experimental

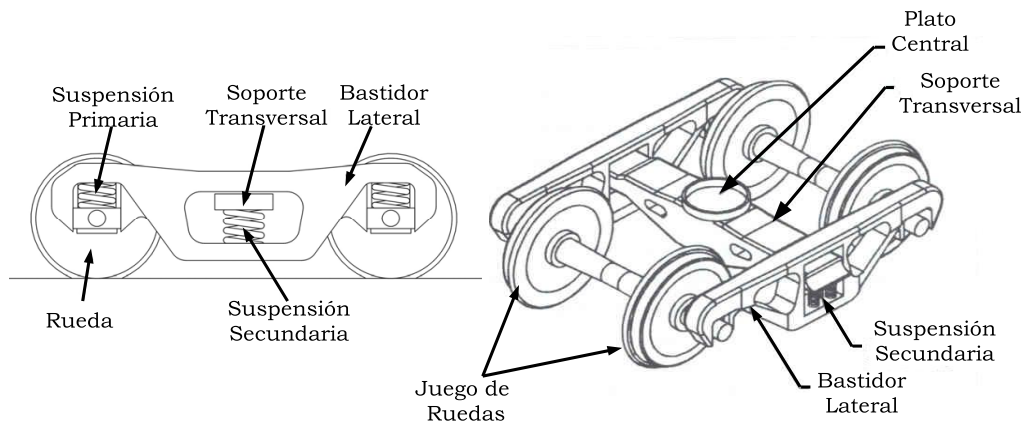


Figura 1: Descripción de los componentes básicos de un bogie de tres piezas [Steffens, 2005].

que se presenta en esta Tesis Doctoral. El primer sistema ha sido instalado en los talleres de mantenimiento ferroviario de [Renfe](#) en Fuencarral (Madrid), en Diciembre de 2009.

Terminología ferroviaria

El ámbito ferroviario tiene su propia terminología. A efectos del presente trabajo, se reduce a:

Material Rodante: vehículos con ruedas que circulan sobre una vía férrea.

Bogie: chasis que vincula dos ejes con ruedas al vehículo ferroviario mediante un pivote que le permite girar (Figura 1). Además, incorpora sistemas de suspensión para mejorar la estabilidad y el confort. Generalmente se monta un bogie cerca de cada extremo del vehículo.

Batalla o empate: distancia entre los dos ejes de un bogie.

Juego de ruedas: montaje que consta de dos ruedas, rodamientos y un eje.

Rueda: elemento de conexión entre el vehículo y el carril. En la Figura 2 se indican las partes principales que componen una rueda ferroviaria.

Llanta: corona de acero tratado térmicamente, cuya superficie exterior es la *banda de rodadura* sobre el carril.

Cubo: establece la unión entre eje y rueda.

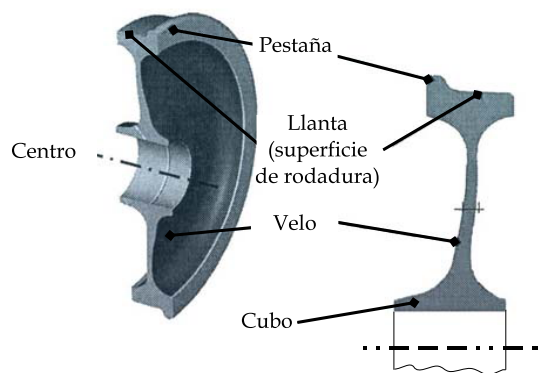


Figura 2: Identificación de las partes de una rueda ferroviaria [Vasauskas et al., 2005].

Velo: corona metálica de unión entre llanta y cubo.

Pestaña: aro saliente al borde de la llanta que contribuye a impedir el descarrilamiento.

Plano: defecto en la banda de rodadura producido por el deslizamiento de la rueda sobre el carril.

Coquera: oquedad en la banda de rodadura.

Defectos en ruedas y técnicas de detección y medida

En este capítulo se describen brevemente los defectos que aparecen en ruedas ferroviarias, sus causas y consecuencias. En particular, los planos se forman por el bloqueo de una rueda con el tren en movimiento y son origen de otros defectos (térmicos, fatiga, etc.).

Paralelamente se describen, también brevemente, las técnicas más utilizadas para detectar estos defectos. En particular se buscan métodos que puedan facilitar la detección de planos en la banda de rodadura, con el tren en marcha y de forma automática.

De este análisis se deduce que no hay ninguna técnica que permita detectar y medir directamente con suficiente resolución el tamaño de los planos. Este hecho justifica el trabajo de investigación dirigido a evaluar una técnica innovadora de detección y medida que se desarrollará en los siguientes capítulos.

1.1. Ruedas ferroviarias

Las ruedas de ferrocarril poseen llantas con un perfil cónico que ayuda a evitar el descarrilamiento y proporciona un efecto de centrado, eliminando posibles desplazamientos laterales en rectas y curvas [Esveld, 2001];[Esveld Consulting Services].

El perfil de la rueda, en su banda de rodadura, ha sido objeto de múltiples trabajos que intentan optimizar tanto el contacto entre el carril y rueda [Magel et al., 2005; Shevtsov et al., 2008; Zakharov et al., 2008], como los materiales de la superficie de la llanta [Dedmon et al., 2006; Lonsdale y Stone, 2002].

De una forma general, existen tres tipos de rueda [Álvarez Rodríguez, 2010]:

Monobloque: en las que llanta y velo forman una única pieza (forja o colada). La unión entre velo y llanta es efectuada por medio de un radio de acuerdo.

De centro y bandaje: en las que la llanta se une al velo a través de un cincho circular metálico con calado en caliente. Frecuentemente el velo no es plano, lo que mejora la suspensión, y la llanta puede separarse del velo para su sustitución cuando llega al final de su vida útil por desgaste.

Elástica: en este caso la llanta se une al velo mediante una banda de goma, que ayuda a reducir ruidos y vibraciones, por lo que se utiliza principalmente en tranvías y metros ligeros.

Las ruedas se fabrican por forja (más frecuente en Europa) o por colada (más usual en EE.UU.). Tras esta primera fase de fabricación, la llanta se somete a un tratamiento térmico de templado y revenido, tanto para aumentar la dureza de la superficie de rodadura como para eliminar tensiones internas residuales del proceso de fabricación.

Tras el proceso de tratamiento térmico en varias fases, la llanta trabaja a compresión desde la superficie de rodadura, mientras que el velo se ha contraído más y produce tracción sobre la llanta [[Molina Sánchez, 2006](#)]. De este modo las tensiones de compresión inducidas en la parte exterior de la llanta dificultan la creación y crecimiento de grietas de fatiga hasta una profundidad aproximada de 40mm, donde la fuerza de tracción del velo compensa la anterior.

Sin embargo, las sollicitaciones bajo condiciones de carga, aceleración y frenado en servicio, pueden llegar a invertir esta situación, convirtiendo las fuerzas de compresión en otras de tracción [[Gordon y Perlman, 2001](#)], condición que facilita la producción de grietas.

Por otra parte, con los sucesivos procesos de reperfilado y consiguiente reducción del diámetro de la llanta, la superficie de rodadura se aproxima a la región interna en la que las tensiones residuales son de tracción. Este hecho establece un límite a la cantidad de material que puede ser eliminada a lo largo de la vida útil de la rueda.

En cualquier caso, las ruedas recién fabricadas se someten a un proceso de inspección por ultrasonidos, para garantizar que están libres de defectos macroscópicos internos. En este proceso se evalúan las posibles indicaciones de ecos que no deben superar el nivel de los producidos por taladros de fondo plano de 1, 2 o 3mm de diámetro, practicados a distintas profundidades en una rueda patrón, en función del nivel de exigencia requerido por la aplicación (por ejemplo, de nivel 1 para ruedas de alta velocidad) [[ISO5948:1994](#)].

1.2. Importancia económica del mantenimiento de ruedas

Además de mejorar los niveles de seguridad y confort, el mantenimiento preventivo de las ruedas tiene importantes efectos económicos. Así, el mayor coste de mantenimiento de las empresas de ferrocarriles se atribuye a la corrección de daños causados en la infraestructura por defectos superficiales en las ruedas [Nicks, 1998]. Por otra parte se ha estimado que el mantenimiento de las ruedas representa hasta el 30 % de los costes asociados a la conservación de los vehículos, siendo la mayor parte atribuida al reperfilado [Cassidy, 2000].

En un análisis realizado por la Asociación Americana de Ferrocarriles (AAR), se pone de manifiesto un incremento en el volumen de ruedas retiradas a partir del año 2000 por causas de *alto impacto*, correspondiente al código 65 de su clasificación, en relación a otras causas (ruedas falladas, desgaste y administrativas). Esto es explicable, por una parte, debido a la mejora de los procesos de fabricación de ruedas, que tiende a reducir las incidencias por estas últimas causas. Por la otra, el incremento de las solicitudes mecánicas (velocidades, aceleraciones y cargas por eje) hace que aumenten las ruedas retiradas por efectos de la fatiga mecánica del material.

Cuando se producen defectos importantes en la banda de rodadura (planos, exfoliaciones, cavidades, etc.), el coste asociado al reperfilado de la rueda en las primeras etapas de formación de los defectos puede ser inferior al de un mantenimiento tardío en el que estos han progresado y pueden requerir la retirada total de la rueda. Así, un factor importante para reducir costes de mantenimiento, es la detección temprana de los posibles defectos, su evaluación en cuanto a características críticas de seguridad y/o agresividad y su eliminación mediante una operación de reperfilado.

Además de estos costes directos, han de considerarse otros que se derivan de aplicar normativas de limitación de ruido, sobre todo en zonas pobladas. Estudios realizados en diversos países de la Unión Europea muestran que la principal fuente de ruido en vehículos ferroviarios se debe a los efectos de rodadura [IMAGINE]. Las irregularidades en la superficie de rodadura generan ruido por impacto, con componentes de frecuencia desde las decenas de hertzios (planos aislados) hasta los 4KHz por vibración en ruedas a alta velocidad [Mellet et al., 2006; Thompson y Jones, 2000].

1.2.1. Mantenimiento periódico de ruedas

Hasta la aparición de sistemas automáticos de inspección de ruedas, cuyo coste de operación puede considerarse prácticamente nulo excluyendo la inversión en los equipos, las ruedas y ejes de los trenes han sido inspeccionados con técnicas manuales a intervalos regulares. Estos intervalos se establecen en función de las condiciones en que opera el sistema ferroviario: velocidad de la línea, construcción de las vías, peso por eje y condiciones climáticas [Cannon et

al., 2003]. No obstante, cada país define sus propias normas y periodos de inspección.

Así, en Japón, se realizan inspecciones de ruedas y ejes cada 30,000Km (o 30 días) en los trenes de alta velocidad, mientras que los bogies se inspeccionan a intervalos de 450,000Km (o 1 año) [Ishizuka, 1999].

En el Reino Unido las inspecciones se realizan, generalmente por ultrasonidos, cada 240,000Km (o 200 días) [Zerbst et al., 2005].

En Alemania y España las ruedas de los trenes de alta velocidad (ICE y AVE, respectivamente) se inspeccionan a intervalos regulares de 250,000Km [Kappes et al., 2000; Álvarez Rodríguez, 2010].

En Italia, la red de alta velocidad TAV inspecciona sus ruedas cada 200,000Km, inmediatamente después del re-perfilado [Molina Sánchez, 2006].

La frecuencia con la que se realizan estas inspecciones en los diversos países, parece buscar un equilibrio entre los costes de la inspección y los que se derivan de la presencia de defectos en las ruedas, aunque siempre manteniendo un elevado nivel de seguridad.

Cuando se generalice el uso de sistemas automáticos, los intervalos entre inspecciones pueden reducirse considerablemente, hasta el extremo de constituir una operación prácticamente transparente dentro de un mantenimiento rutinario (por ejemplo, lavado del tren). Esta forma de operar introduciría un elevado grado de redundancia y, además, facilitaría un seguimiento de la evolución de los defectos antes de que aumente su gravedad. El nivel de seguridad que proporciona esta metodología permitiría, en un futuro, disminuir la frecuencia de los re-perfilados, con las consiguientes reducciones en costes de mantenimiento y ruedas.

1.3. El contacto rueda-carril

La interacción estática y dinámica entre rueda y carril es un aspecto esencial para entender los mecanismos de desgaste y formación de defectos superficiales, por lo que ha sido objeto de numerosos estudios, iniciados con la teoría de contacto de Hertz en 1882, que continúan en la actualidad [Knothe, 2008].

En este sentido, Hertz demostró que cuando dos cuerpos se comprimen juntos bajo condiciones de elasticidad, espacios semi-infinitos y grandes radios de curvatura constantes, la superficie de contacto es una elipse [Iwnicki, 2006]. Los semiejes de esta elipse son proporcionales a la raíz cúbica de la carga equivalente sobre la rueda en condiciones estáticas, y a coeficientes que dependen de los radios de curvatura de rueda y carril y de las constantes elásticas de los materiales.

Una vez conocida el área de contacto, pueden determinarse las fuerzas ejercidas por la rueda sobre el carril en condiciones dinámicas [Otero Yugat, 2009]. Estos esfuerzos son responsables del desgaste de la banda de rodadura y de la fatiga del material que está cíclicamente sometido a esfuerzos de tracción y expansión. Asimismo, la huella del contacto y su comportamiento con el tren en movimiento tiene sus efectos sobre el propio carril. Diversos estudios verifican experimentalmente por ultrasonidos la forma geométrica del contacto rueda-carril y la distribución de los esfuerzos mecánicos en la elipse [Marshall et al., 2006].

Los diseños del perfil de la rueda tratan de optimizar el comportamiento en condiciones dinámicas, tanto para que el tren resulte poco agresivo para la infraestructura como para reducir el desgaste de la banda de rodadura y aumentar la seguridad.

La teoría de contacto de Hertz considera radios de curvatura constantes. Sin embargo, cuando en la superficie de rodadura se producen planos, los radios de curvatura locales varían significativamente. De hecho en los bordes de un plano recién formado, el radio de curvatura es pequeño en los bordes e ∞ en plano. A partir de cierto tamaño, un plano debe considerarse un defecto crítico, pues sus efectos de carga de impacto son muy superiores a los estimados para el diseño de la rueda en condiciones estáticas o de operación normal con ruedas perfectamente circulares.[Kalker et al., 1993].

Los planos son defectos importantes tanto por el daño que producen en la infraestructura fija, como por ser origen de otros defectos en las ruedas que se ven sometidas a mayores esfuerzos de fatiga en puntos localizados. Además, no sólo afectan a la rueda que presenta el plano, sino que los impactos también se transmiten a la rueda asociada en el mismo bogie y a los rodamientos [Uzzal et al., 2008].

Un plano recién formado provoca una pérdida de radio en la rueda. Con el movimiento va a evolucionar con cierta rapidez a un plano degenerado en el que los bordes se suavizan, su longitud aumenta y se mantiene la máxima pérdida de radio [Snyder et al., 2003]. A partir de cierta velocidad de circulación (típicamente 50Km/h), la inercia hace que se pierda el contacto rueda-carril. En estas condiciones la rueda tiende a descender sobre el carril mientras que éste asciende al quedar libre de carga. Estos dos movimientos opuestos producen un fuerte impacto cuando se recupera el contacto, que se mantiene relativamente constante con la velocidad, y que es varias veces superior a la fuerza estática [Pieringer y Kropp, 2008].

1.4. Defectos en las ruedas

Las ruedas pueden presentar diferentes tipos de daños sobre la banda de rodadura, que es la zona de mayor interés por estar permanentemente expuesta a demandas mecánicas y a desgastes [Zakharov, 2001]. En función de su origen, pueden clasificarse en las siguientes categorías:

Desgaste: daño asociado a mecanismos de rozamiento que alteran el perfil original de la rueda, que influye en el desgaste tanto en dirección axial como circunferencial [Kang y Lee, 2004]. El desgaste natural -no inducido por operaciones de re-perfilado- debe considerarse un coste asociado a la operación del tren, que depende de múltiples factores (perfil de la rueda, materiales, carga, velocidad, diseño y comportamiento dinámico del vehículo) y puede estimarse, al menos de forma empírica. Por consiguiente, no es estrictamente un defecto, si como tal se entienden los daños que se presentan de forma imprevista en la banda de rodadura.

Deformación: el perfil de la banda de rodadura pierde su geometría original a consecuencia de altas presiones de contacto o materiales no homogéneos. Puede darse en toda la circunferencia o en zonas determinadas y, frecuentemente, se asocia a un desgaste excesivo en el que pueden producirse efectos de delaminación y de deformación plástica [Lewis et al., 2003, 2002, 2004a]. La Figura 1.1 muestra una rueda con deformación o desgaste grave, con la aparición de una falsa pestaña en el lado opuesto de la rueda que producirá daños en el carril. Una banda de rodadura con elevados niveles de deformación también afecta a los límites de estabilidad del vehículo.

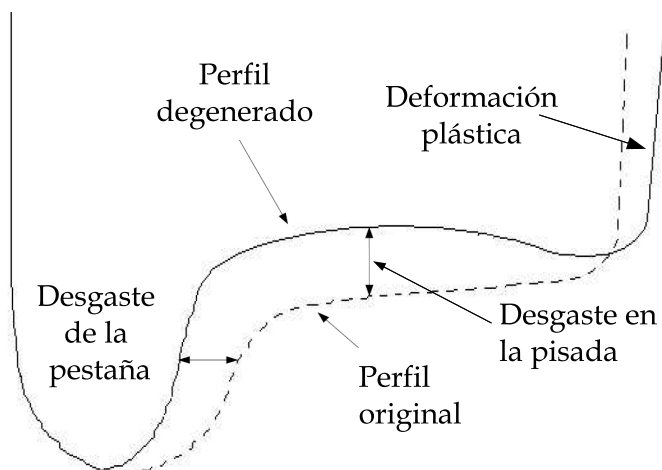
Fatiga: es el defecto más importante y frecuente en la banda de rodadura. Se produce por las demandas mecánicas de compresión y tracción a las que se somete la llanta con el tren en movimiento. La fatiga del material da lugar al desarrollo de grietas que pueden llevar a una posterior pérdida de material en la banda de rodadura (*exfoliación*). La presencia de planos, además del deterioro producido en el material por sobrecalentamiento durante su formación, produce fuerzas de impacto que aumentan los esfuerzos de fatiga en sus regiones próximas.

Térmico: el deslizamiento de la rueda por falta de adherencia al carril durante operaciones de frenado puede causar un calentamiento que excede el límite térmico del material, cambiando su fase. El posterior enfriamiento puede dar origen a la formación de martensita, mucho más frágil, y al desarrollo de grietas. La posterior pérdida de material en la banda de rodadura da origen a *excoriaciones*. Desde el punto de vista geométrico, el deslizamiento da lugar a la formación de uno o varios planos.

Debe destacarse que las ruedas severamente dañadas presentan una combinación de defectos [Deuce, 2007]. Frecuentemente, el origen puede ser la formación de un plano, con el consiguiente daño térmico que dará lugar a escoriaciones; las fuerzas de impacto producidas por dicho



(a) Rueda con desgaste grave (foto: [Roney \[1999\]](#)).



(b) Principales zonas de desgaste.

Figura 1.1: Desgaste en la banda de rodadura.

Clasificación de defectos sobre la banda de rodadura		
Tipo de Defecto	Clasificación	Dimensión crítica
Planos	Aislados	Mayores a 30mm
	Múltiples	Mayores a 40mm
	Desgaste	Más de 0.7mm
Grietas	Por efecto térmico debido al frenado	A partir de 40mm
	Por fatiga de contacto de rodadura	A partir de 40mm
	Por efecto térmico producido por patinada	No exceder los 40mm
	Cavidades	15mm de longitud circunferencial

Tabla 1.1: Identificación de defectos sobre la banda de rodadura y sus dimensiones críticas según estándar GM/GN2497.

plano, aumentan los esfuerzos de fatiga, dando lugar a la formación de grietas y exfoliaciones. De este modo, un único defecto inicial puede ser causa de múltiples daños, lo que subraya la importancia de detectar y corregir los defectos en sus fases tempranas.

Sin embargo, no todos los defectos se consideran críticos. El estándar británico GM/GN2497 [RSSB:GM/GN2497, 2007], establece los criterios para considerar las dimensiones críticas de los defectos sobre la banda de rodadura, mostrándose un resumen en la Tabla 1.1. A continuación se reseñan algunos aspectos particulares de los defectos más relacionados con el presente trabajo (defectos de fatiga y de origen térmico).

1.4.1. Defectos por fatiga de contacto

Los defectos por fatiga de contacto de rodadura (*rolling contact fatigue*, RCF) son consecuencia de las fuerzas laterales y verticales sobre el área de contacto rueda-carril. Tienen importancia en este estudio porque la presencia de planos aumenta los esfuerzos que están en el origen de los defectos por RCF, cuyos mecanismos de inicio y propagación se exponen aquí brevemente.

Particularmente, las fuerzas dinámicas con componentes de alta frecuencia, como las causadas por planos, (100-1250 Hz) contribuyen significativamente al desarrollo de la RCF [Gullers et al., 2008; Nielsen, 2008]. La exfoliación (*shelling*) es un resultado de este proceso: las tensiones residuales bajo la superficie de contacto se incrementan con los ciclos de carga de la rueda. Estas tensiones aumentan hasta que, finalmente, terminan en el desprendimiento de pequeños trozos de la superficie de rodadura [Lonsdale, 2001]. La Figura 1.2 muestra una cavidad formada por un proceso de exfoliación.

Por otra parte, cuando se supera el límite elástico del material, aparecen deformaciones plásticas, que dan origen a la formación de grietas en sentido perpendicular a la dirección de la



Figura 1.2: Cavidades formadas por procesos de exfoliación (foto: [RSSB:GM/GN2497](#) [2007]).

deformación. A este fenómeno de formación de grietas superficiales se le conoce como *ratch-etting* [[Kabo, 2002](#); [Shevtsov, 2008](#)] y se clasifican en función de la profundidad a la que se originan [[Lewis et al., 2004b](#)]:

Grietas superficiales: formadas en la superficie de rodadura a consecuencia de un exceso de plasticidad del material, son las más comunes. Generalmente no son peligrosas, aunque su reparación por reperfilado tiene asociados unos costes elevados.

Grietas sub-superficiales: se inician a algunos milímetros de la superficie de rodadura, progresando hacia el exterior, donde pueden provocar la fractura y pérdida del material marcado por la ramificación de las grietas. Generalmente se inician por fuertes cargas de impacto (por ejemplo, presencia de planos).

Grietas profundas: su origen se sitúa a más de 10mm de la superficie de rodadura y se deben, principalmente, a defectos del material. Los esfuerzos de fatiga hacen que se este tipo de grietas se propaguen hacia el exterior o el interior, donde son más peligrosas. Por esta razón, las ruedas se inspeccionan inmediatamente después de su fabricación, verificando que están exentas de defectos profundos importantes.

Los fenómenos de iniciación y propagación de las grietas asociadas al contacto de rodadura son complejos y dependen de múltiples factores: longitud y ángulo inicial de la fisura, fuerzas de contacto y de fricción, dureza de la banda de rodadura e, incluso, la fuerza hidráulica ejercida

por fluidos dentro de la grieta [Chue y Chung, 2000]. La rugosidad de la superficie del carril también influye, aumentando el tamaño de las grietas [Ekberg et al., 2007].

El análisis de la formación y propagación de defectos por fatiga de rodadura se ha hecho mediante modelado y técnicas de elementos finitos [Liu et al., 2006; Tehrani y Saket, 2009]. Estos métodos predicen la forma en que se propagan defectos sub-superficiales en función de los factores mencionados anteriormente. Una conclusión, contrastada por la práctica, es la formación de delaminaciones internas, inicialmente circulares y paralelas a la superficie de rodadura, pero que van progresando hacia formas elípticas con el eje mayor en la dirección del carril [Liu et al., 2007]. Eventualmente, se produce el desprendimiento de parte del material con esta forma geométrica.

Experimentalmente se ha estudiado este fenómeno con montajes de laboratorio como los descritos por Garnham y Beynon [1991]; Guagliano y Vergani [2005]. El método consiste en desgastar dos cuerpos cilíndricos con ejes perpendiculares entre sí y en contacto que simulan la rueda y el carril.

Por lo general, el origen de los defectos sub-superficiales se ubica entre los 3 y 5mm hacia el interior desde la banda de rodadura y entre 75 y 105mm de la cara interior de la llanta. Para su iniciación se requieren altos niveles de carga, que pueden ser producidos por impactos en irregularidades, como son los planos en la superficie de rodadura [Zerbst et al., 2005].

Las grietas de origen profundo requieren una mayor atención y deben ser detectadas a tiempo para evitar graves daños (descarrilamiento). Este tipo de defecto afecta sobre todo a ruedas viejas por tener una calidad metalúrgica más variable. Por otra parte, el diámetro de la rueda influye significativamente en la velocidad de propagación de estos defectos. Así, Lynch et al. [2001], determinaron que las grietas inferiores a 25mm en dirección circunferencial no tienen un carácter crítico urgente (control dentro de 3-6 meses) en ruedas de diámetro grande ($>905\text{mm}$), pero sí para ruedas de diámetro inferior, para las que se recomienda su retirada inmediata del servicio.

1.4.2. Grietas de origen térmico

Las ruedas de tren están expuestas a deslizamientos por diversas causas: acción de los frenos y del sistema anti-bloqueo, hojas en las vías, condiciones climáticas, alineamiento incorrecto de ruedas, derrape, etc. Además de la formación de un plano en la superficie de rodadura, que se analiza más adelante, el aumento de temperatura por deslizamiento puede ser causa de otros defectos, como excoりaciones y grietas.

Cuando la energía instantánea provocada por la fricción de la rueda es grande, la llanta puede sufrir una elevación de temperatura que supere el límite de austenización ($>720^{\circ}\text{C}$). Una rápida disminución posterior de temperatura provoca la formación de martensita, una fase dura y frágil



Figura 1.3: Excoriación de la rueda ocasionado por la formación de martensita (foto:TM).

del acero que se fractura fácilmente. Bajo ciclos de carga en operación la martensita facilita la formación de fisuras que terminan en pérdidas de material de rodadura, como muestra la Figura 1.3 [Thanh, 2003]. El espesor de la capa de martensita que se forma bajo la superficie de rodadura a consecuencia del proceso calentamiento-enfriamiento, varía normalmente entre 0.1 y 0.5mm, aunque puede alcanzar mayores dimensiones con grandes deslizamientos [Zakharov y Goryacheva, 2005].

Por otra parte, en las áreas afectadas por estos efectos térmicos, la fatiga del material aumenta, facilitando el crecimiento de grietas. En principio, éstas son finas y de poca profundidad, ubicándose a lo largo de la circunferencia de la rueda [Kumagai et al., 1991], denominándose excoriaciones (*spalling*).

La formación de grietas de origen térmico tiene su origen en diferencias de temperatura entre el velo y la llanta, especialmente tras operaciones de frenado con zapatas. Así, mientras que la llanta se calienta, velo y cubo permanecen a temperaturas más bajas, generando tensiones en la rueda que, en condiciones normales, son elásticas y desaparecen al enfriarse la rueda.

Sin embargo, bajo condiciones inusuales, como un freno bloqueado, las tensiones producidas pueden deformar la llanta más allá de límite elástico, permaneciendo aun después de enfriarse. Estas tensiones residuales dan lugar a la formación de grietas en la superficie de rodadura de origen térmico [Stone y Carpenter, 1994]. Según su forma han sido clasificadas como [Kumagai et al., 1991]:



Figura 1.4: Plano simple formado sobre la banda de rodadura (foto: [AMTAB](#)).

Grieta pelo: originada por fuerzas de frenado que provoca una tracción en la superficie de rodadura; se desarrolla en línea recta, en dirección axial.

Grieta en red: formada por esfuerzos de tracción residuales tras un calentamiento local.

Grieta en serpenteo: de forma arbitraria, que se origina por tracción en diferentes direcciones como consecuencias de deslizamientos en curvas.

1.4.3. Planos en ruedas ferroviarias

Los planos constituyen uno de los defectos más comunes en las ruedas ferroviarias, en especial en vehículos que carecen de sistemas anti-deslizamiento (*wheel slip prevention* WSP o *anti-lock braking system* ABS) [Kawaguchi, 2006]. Los planos se forman por el bloqueo total o parcial de la rueda mientras el vehículo está en movimiento (Figura 1.4). Esta situación produce, además de pérdidas de material por abrasión, daños térmicos por el calor generado [Deuce, 2007]. Como se ha expuesto, los daños térmicos están, a su vez, en el origen de otros defectos.

Los sistemas anti-bloqueo reducen la fuerza de los frenos cuando detectan reducciones bruscas en la velocidad de giro de la rueda, existiendo realizaciones mecánicas, electrónicas y computarizadas. Tienden a reducir la distancia de la frenada y, al mismo tiempo, evitan el bloqueo de la rueda y su deslizamiento sobre el carril.

Su grado de efectividad depende, además de la tecnología utilizada para su realización, del estado de la banda de rodadura y del rail. Pues, a diferencia de los sistemas incorporados en otros vehículos, los sistemas WSP en trenes son más críticos, al caer mucho más rápidamente la fuerza de rozamiento rueda-carril que mantiene el giro de la rueda que la de accionamiento de los frenos. Así, con frecuencia, la acción del sistema WSP es cíclica, manifestándose en forma de secuencias de cortos periodos de bloqueo y desbloqueo de los frenos, lo que produce múltiples planos repartidos en la circunferencia de la rueda.

Los planos también pueden generarse a consecuencia de condiciones climáticas adversas. Así, en regiones frías durante la temporada invernal, la formación de planos sobre la banda de rodadura es frecuente. Una de las causas es el bloqueo de los frenos por congelación cuando los trenes están detenidos durante la noche. Al ponerse en marcha el tren, algunos ejes no giran libremente, dañando las ruedas [Kloow y Jenstav, 2006].

El trabajo realizado por Verheijen et al. [2007] destinado a la medición de niveles del ruido generado por los trenes en Holanda, encontró que estos aumentaban en otoño. La causa radica en la concentración de hojas sobre el carril y la consiguiente reducción de la adherencia durante el frenado, que incrementa la producción de planos. El mismo hecho ha sido también verificado en el Reino Unido, EE.UU., Irlanda, Alemania y, en general, en todas las regiones donde se produce acumulación de hojas sobre los raíles [Shooter, 2004]. Para evitar la formación de planos, los trenes deben circular a velocidades reducidas, produciendo importantes retrasos.

Generalmente se distinguen tres tipos de planos:

Patinado: es una elongación del punto de contacto, causado por el deslizamiento de la rueda sobre el carril. Aunque no llegue a perderse material, se producen daños térmicos en la superficie de rodadura [Deuce, 2007].

Aislados: el área dañada tiene una forma oval y se origina por el bloqueo de un eje de vehículos en marcha. La carencia de sistemas anti-bloqueo (WSP) contribuye a la formación de estos defectos [Kawaguchi, 2006].

Múltiples: conjunto de pequeños planos aislados. Se presentan con frecuencia en ruedas de tren de alta velocidad y otros en los que se utilizan frenos de disco asociados a sistemas anti-bloqueo. El comportamiento cíclico del WSP hace que se produzcan múltiples planos, generalmente de pequeño tamaño, pero se corre el riesgo de que se formen grietas bajo la superficie de rodadura [Grosse et al., 2002].

Coqueras: son oquedades más o menos esféricas, cuyo origen está en la inclusión de partículas de material ajeno a la rueda en la banda de rodadura. La grava sobre el carril, por ejemplo, puede causar este tipo de daño [Ekberg y Kabo, 2005; Kabo y Ekberg, 2002]. Aunque por su origen no son estrictamente “planos”, sus efectos sobre el

comportamiento dinámico de la rueda son similares, produciendo fuerzas de impacto, vibraciones y grietas.

Las fuerzas de impacto producidas por la presencia de planos en la banda de rodadura son muy importantes, llegando a ser hasta 4 veces superiores a las encontradas en ruedas normales; un plano de 60mm de longitud, con una profundidad comprendida entre 0.9 y 1.4mm, aumenta la carga dinámica en 30KN/mm con traviesas de madera y en 50KN/mm si son de cemento [Vyas y Gupta, 2006]. La fuerza del impacto genera aceleraciones muy elevadas, del orden de 500g, que pueden causar daños en rodamientos y suspensión. Por otra parte, estas fuerzas de impacto aumentan el tamaño de las grietas superficiales en factores próximos a 100 [Stratman et al., 2007].

Un plano recién formado tiene la forma de una cuerda sobre la circunferencia de la rueda. El bloqueo temporal de unos milisegundos de un eje que se desplaza a 20Km/h con una carga de 20Tm genera un plano de 40mm de longitud [Jergéus et al., 1999]. Los exhaustivos ensayos realizados por este grupo (experimentos de Silinge, Suecia), incluyeron la formación de más de 200 planos en condiciones controladas de carga, velocidad, duración del deslizamiento y coeficiente de fricción rueda-carril. En todos los casos se observó la formación de martensita bajo los planos, con la consecuente probabilidad de que se produzcan excoりaciones.

Así, paralelamente a la búsqueda de técnicas que reduzcan las causas de formación de planos, una buena práctica de mantenimiento ferroviario elimina por re-perfilado los que se hayan formado antes de que puedan provocar daños mayores en la rueda y en otras partes del vehículo y carril.

1.4.4. Ovalidad de la rueda

El desgaste irregular en ruedas y carriles - *corrugación* [Grassie et al., 1999], y la respuesta dinámica al impacto de un plano, son algunos de los aspectos más estudiados en la interacción dinámica del vehículo-carril. La forma ovalada o fuera de redondez (*out-of-round*, OOR) de una rueda genera severos impactos de carga sobre el carril que perjudican a rodamientos, infraestructura, etc. (Figura 1.5a). Las emisiones del ruido generado por el impacto afecta al confort de los pasajeros, y disminuye la calidad del servicio prestado por las empresas ferroviarias. Por lo tanto, el desgaste y la deformación de las ruedas tienen un coste significativo para las compañías si no son reparadas o retiradas pronto de servicio. La forma de la OOR puede clasificarse en:

Periódica: la deformación es regular y de forma determinada. Por ejemplo; una deformación de tercer orden, tiende a transformar la circunferencia de la rueda en una forma triangular. La excentricidad, o deformación de primer orden, puede ser causada por una desalineación del juego de ruedas durante el torneado [Johansson y Nielsen, 2003].

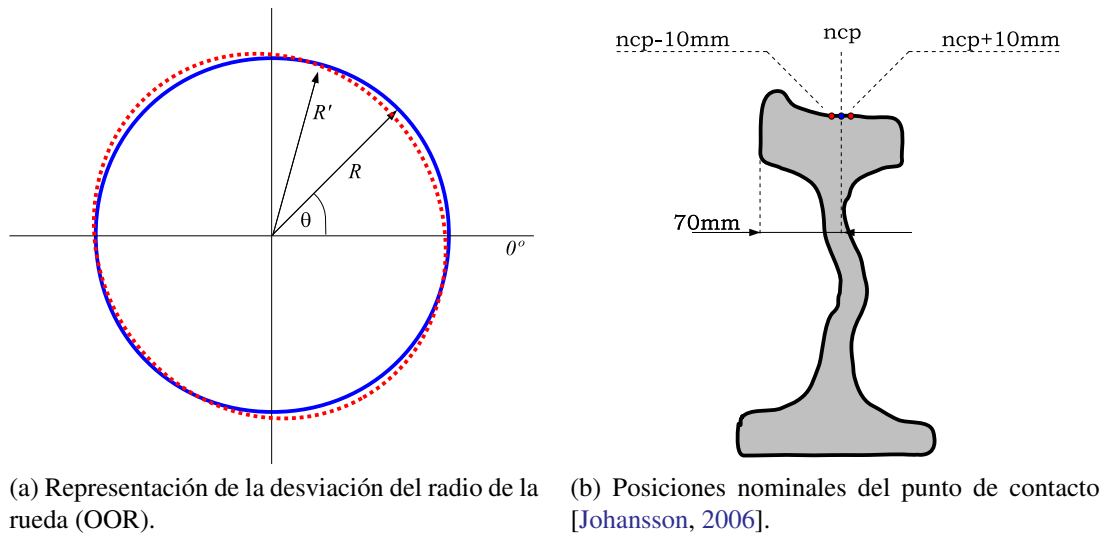


Figura 1.5: Desviación en el radio de la rueda (OOR).

Estocástica: la deformación no tiene una forma definida. Puede ser causada por la falta de homogeneidad en el material de rodadura. La formación de microestructuras como martensita y bainita en la llanta, terminan en exfoliaciones y/o la pérdida de material debido al agrietamiento de la superficie de rodadura por RCF [Snyder et al., 2003]. Las variaciones de radio por la formación de microestructuras habitualmente están entre 0.5 y 1mm. Generalmente estos defectos se eliminan tras una operación de torneado [Deuce, 2007].

Una forma de determinar la ovalización consiste en tomar una serie de medidas del radio alrededor de la circunferencia, sobre tres posiciones en la generatriz: la posición nominal de contacto *ncp*, y a 10mm de cada lado de esta posición. Por lo general, el punto nominal de contacto se encuentra ubicado a 70mm desde la cara interior de la pestaña [Deuce, 2007; Johansson, 2006]. La Figura 1.5b indica la posición del punto nominal de contacto sobre la llanta.

1.5. Métodos de inspección

A lo largo de los años se han desarrollado diversas técnicas para la detección y evaluación de defectos en ruedas ferroviarias. Algunas son dinámicas (esto es, operan con el tren en marcha), otras son estáticas (realizan la inspección a tren parado) y, finalmente, otras requieren desmontar las ruedas para su inspección o se han diseñado para validar las ruedas inmediatamente después de su fabricación.

Las inspecciones visuales o manuales en servicio son cada vez menos frecuentes por su elevado coste en tiempo y baja fiabilidad. No obstante, son prácticas que se emplean sistemáticamente cuando se han detectado defectos importantes por medios automáticos.

Entre las técnicas manuales más utilizadas están los ultrasonidos y las corrientes inducidas (*Eddy currents*) [Rockstroh et al., 2008; Shubochkin, 2005; Tsompanidis y Tsiakas, 2007]. Menos frecuentes son otras que combinan partículas magnéticas con técnicas de visión [STARMANS]. Una alternativa interesante, actualmente en proceso de investigación, es la detección de defectos sub-superficiales por cambios en el ciclo magnético del material debidos a la fatiga de rodadura [Zurek, 2006].

Pero, como es lógico, los operadores están principalmente interesados en técnicas dinámicas para detectar defectos en servicio, sin necesidad de desmontar la rueda ni detener el tren, por el menor coste en tiempo de la operación de mantenimiento preventivo. En particular, resultan atractivas las opciones que realizan la inspección de forma automática cuando el tren ingresa en un taller de mantenimiento, por ejemplo.

Los métodos de inspección dinámica para la detección de planos y otras irregularidades en la banda de rodadura se pueden clasificar en tres grandes grupos, de acuerdo a la técnica utilizada:

- ✧ Medida de la carga o impacto de la rueda sobre el carril.
- ✧ Medida de variaciones de radio, tomando la pestaña como referencia.
- ✧ Detección y medida directa de defectos.

Con frecuencia se combinan diversos métodos para detectar defectos de diferente tipología y para asegurar la integridad estructural de la rueda. En los próximos apartados se describirán brevemente los diferentes sistemas automáticos de detección de defectos, particularmente los que afectan a la banda de rodadura y planos.

1.5.1. Detección de defectos por medición de cargas e impactos

Es una técnica muy extendida, que se basa en medir en un carril instrumentado los impactos de carga generados por la rueda a su paso. Se caracteriza por evaluar los efectos causados por las irregularidades (fuerzas de impacto), cualesquiera sea su naturaleza. Por consiguiente, no son adecuadas para medir la extensión de los defectos (por ejemplo, longitud de los planos o pérdidas de material) y, frecuentemente, las medidas son dependientes de la velocidad del tren. Los sensores más utilizados son galgas extensiométricas (cargas) y los acelerómetros (impactos).

Sistemas basados en galgas extensiométricas

Las galgas extensiométricas son dispositivos cuya resistencia eléctrica varía, de forma conocida, al ser sometido a deformaciones. Suelen fabricarse en forma de película que, normalmente se pega al rail de medida, estimando la fuerza de compresión de la rueda a partir de la deformación elástica del carril. Usualmente se conectan en configuración de puente de Wheatstone. El desequilibrio del puente se mide mediante amplificadores diferenciales que, además, reducen la incidencia del ruido de modo común. Por otra parte, para aumentar la sensibilidad, las galgas extensiométricas se pueden pegar sobre una placa ranurada que opera como un amplificador mecánico [Rodems et al., 1992].

Uno de los sistemas más conocidos para medir la carga de las ruedas de tren, basado en galgas extensiométricas, es WILD (*Wheel Impact Load Detector*, ver Figura 1.6), utilizado por el Reino Unido a partir de 1985 [Salient Systems Inc.]. En este caso las galgas extensiométricas se montan directamente en el velo del carril, en forma de puente resistivo ocupando unos 30cm entre las cuatro ramas, para medir la fuerza en sentido vertical y lateral. Un carril instrumentado consta de hasta 128 galgas extensiométricas y la carga estática del vehículo se substrahe de la medida realizada, pero no puede cancelarse el efecto de la velocidad del tren [Stratman et al., 2007]. Cuando se supera un umbral determinado, se alza una alarma para verificar el defecto por otros medios. Toda la información recogida por el sistema se almacena en una base de datos, para analizar la evolución de los posibles defectos en cada rueda y cada vehículo [James, 2003].

Otro sistema similar al anterior, *WheelCheckTM*, desarrollado por AEA Technology Rail también utiliza galgas extensiométricas en el carril para evaluar la carga vertical de la rueda. A diferencia del anterior, la medición se efectúa entre las traviesas y, como en el anterior, los datos se procesan en un computador central [Thanh, 2003].

En Japón se desarrollaron sistemas basados en acelerómetros y galgas extensiométricas por la empresa KYOWA, que demandan velocidades de circulación inferiores a 15Km/h.

Aunque, en general, con galgas extensiométricas sólo se miden las fuerzas verticales (que son las más importantes para la detección de defectos en la banda de rodadura), se han diseñado



Figura 1.6: Detector de impacto de carga *WILD* (foto: [Salient Systems Inc.](#)).

sensores que permiten medir simultáneamente esfuerzos verticales y horizontales producidos por el contacto rueda-carril. En este caso, un estudio por elementos finitos de la distribución de cargas en un agujero practicado en el velo del rail, condujo a un diseño en el que las fuerzas laterales y verticales pueden desacoplarse [Bracciali y Folgarait, 2004]. El nuevo sensor incluye dos cojinetes dotados de galgas extensiométricas, en el que cada uno de ellos proporciona una medida que es combinación lineal de fuerzas verticales y de flexión. El posterior procesamiento facilita la extracción de cada componente. Una de las ventajas radica en la facilidad de instalación y mantenimiento, requiriendo entre 16 y 32 sensores para realizar medidas a una velocidad relativamente elevada (90Km/h).

Sistemas basados en acelerómetros

Los acelerómetros son transductores cuya salida es proporcional a la aceleración de una masa constante con o sin amortiguamiento que forma parte del sensor. Existen múltiples tecnologías para realizar estos dispositivos, básicamente dedicadas a medir el desplazamiento de la masa con distintos métodos (capacitivos, magnéticos, piezoeléctricos, ópticos, etc.).

La tecnología MEMS (*Micro Electro-Mechanical Systems*) es una de las más utilizadas. En este caso, la masa está suspendida en voladizo por una lámina de silicio obtenida por tecnología microelectrónica (técnicas fotolitográficas y ataque químico). Al someter la masa a aceleraciones, sufre desplazamientos que se miden, generalmente, por cambios de capacidad de un condensador formado entre la lámina vibrante y un electrodo fijo a la estructura. Al tratarse de tecnología microelectrónica, estos dispositivos integran amplificadores y acondicionadores de

señal para dar una medida proporcional a la aceleración. En algunos casos, también se incluyen circuitos de compensación ante variaciones de temperatura y autocalibrado [Chu, 2007].

Para medir continuamente el estado de la banda de rodadura y, particularmente, la formación de planos, se ha propuesto integrar acelerómetros en los rodamientos de las ruedas, midiendo la aceleración vertical [Uzzal et al., 2009]. Al integrarse en un vehículo específico, su diseño se particulariza para los parámetros que intervienen en el comportamiento dinámico, mejorando su capacidad de discriminación entre rueda sana y con defectos (planos).

Pero, en general, los acelerómetros se montan sobre los raíles, de forma análoga a como se hace con las galgas extensiométricas. En este caso, resulta más complicado interpretar la aceleración medida como causa de un defecto en la banda de rodadura, ya que el paso de cada rueda produce una cierta aceleración y la medida depende estrechamente de la velocidad y carga del tren. En conjunto, cualquier sistema de detección de defectos en la banda de rodadura (planos, coqueras, etc.) basado en acelerómetros, requiere el empleo de técnicas de procesamiento digital sobre los registros proporcionados por los sensores.

Por otra parte, resulta difícil desacoplar los efectos de aceleración producidos por las ruedas montadas en el mismo bogie. Generalmente, los sistemas basados en acelerómetros detectan que existe un problema en *alguna* rueda del bogie, dejando para una posterior inspección (manual, por ejemplo), la localización y evaluación del defecto, a pesar de utilizar técnicas avanzadas de procesamiento digital de señal [Belotti et al., 2003, 2006].

Otro problema asociado es que los defectos superficiales pueden estar ubicados en cualquier posición de la circunferencia de la rueda, mientras que los sensores se sitúan en posiciones fijas y discretas. La sensibilidad para la detección decrece con la distancia a la que el defecto entra en contacto con el carril respecto a la posición del sensor. Por esta razón, se deben utilizar múltiples sensores para cubrir, al menos (sin redundancia) una longitud igual al desarrollo de la rueda (típicamente entre 2.2 y 3.2m). Puesto que el empuje (distancia entre ruedas en un bogie, típicamente entre 1.5 y 2.8m) puede ser inferior a esta distancia, se mezclarán las indicaciones de las dos ruedas.

Para evitar este problema se ha propuesto dividir el carril de medida en secciones separadas y desacopladas de vibraciones [Tillman y Glazar, 1971]. En su realización, sólo se utilizan 3 secciones de medida dotadas de acelerómetros, cuya salida se procesa mediante filtros y detectores de umbral. La separación entre secciones produce un fuerte impacto de la rueda sobre el carril de medida, que es ignorado mediante una puerta temporal accionada por detectores de presencia de rueda que, simultáneamente miden la velocidad de desplazamiento del tren.

Posteriormente se han propuesto otras técnicas que operan sobre un carril convencional donde se evitan los inconvenientes mencionados y se proporciona continuidad eléctrica para el retorno de corriente. Para ello, se planteó la instalación de múltiples acelerómetros sensibles a vibraciones verticales en una sección de carril [Danneskiold-Samsøe, 1987]. Las señales proporcionadas

por los sensores se almacenan durante la circulación del tren y son posteriormente procesadas. Para aislar la información de cada rueda, se combinan las indicaciones individuales de dos subconjuntos de acelerómetros separados por la distancia equivalente al empuje. Finalmente, la presencia de defectos superficiales se estima por cruce de umbral.

En Polonia se realizó un sistema de detección de impactos de ruedas mediante acelerómetros [GRAW]. El sistema determina el tamaño de los defectos contrastando los resultados de las medidas con los proporcionados por otras técnicas [Madejski, 2006]. Dada la gran dependencia de la salida de los acelerómetros con otros factores (velocidad, carga, distancia del impacto al sensor, etc.), no parece un método muy convincente para cuantificar el tamaño de las irregularidades, salvo en situaciones muy particulares.

Otras técnicas de medida

Uno de los métodos más conocidos para detectar automáticamente la presencia de planos en ruedas de tren en marcha consiste, simplemente, en analizar el sonido producido en su movimiento. De hecho, es el método que se ha venido utilizando por los inspectores en el tren para detectar, por simple audición, la presencia de planos y otras anomalías.

Un plano en una rueda produce un sonido metálico periódico, cuya frecuencia de repetición es inversamente proporcional al diámetro de la rueda y directamente proporcional a la velocidad del tren. La discriminación de esta frecuencia de repetición de “golpes” respecto al ruido de fondo generado por el tren es relativamente fácil mediante filtros [Svet, 1978] o análisis de Fourier, particularmente si se conocen la velocidad del tren y el diámetro de las ruedas. Los problemas asociados a esta técnica son: el registro debe realizarse sobre una longitud considerable para poder aplicar métodos redundantes (múltiples vueltas de rueda), la localización precisa del defecto y la necesidad de una cierta velocidad del tren para detectar los planos con mayor grado de desgaste.

Las vibraciones producidas por planos en las ruedas de tren también han sido medidas y evaluadas con fibra óptica y técnicas interferométricas [Anderson, 2006]. Las vibraciones inducidas en el sensor iluminado con luz coherente se traducen en variaciones de la intensidad luminosa (*speckle*), extrayendo la información mediante transformada de Fourier y post-procesamiento. Las técnicas interferométricas son inmunes al ruido EMI, pero costosas y delicadas.

Una alternativa consiste en aprovechar la variación de la longitud de onda de la luz en fibras ópticas con su deformación (sensores FBG o *Fiber Bragg Grating*) [Antunes et al., 2007]. Aunque la variable medida es la misma que en el caso de las galgas extensiométricas (deformación de un carril elástico), las FBGs son inmunes al ruido de interferencia electromagnética (EMI), muy importante por las conmutaciones eléctricas en la catenaria y locomotora. Además, el uso de fibras ópticas puede servir para realizar múltiples medidas de forma distribuida [Tam et al., 2007]. El sistema ha sido instalado a lo largo de 36Km en Hong Kong en cinco estaciones de

medida de cargas sobre el rail. La información se envía por fibra óptica a un computador central. Además, el sistema permite obtener información de temperatura y carga en los vehículos. En este sentido, constituye el primer intento de construcción de una red inteligente de sensores ferroviarios.

Una propuesta elegante implanta uno o varios sensores lineales en el velo del rail y en paralelo para medir las deformaciones sufridas por el carril al paso de una rueda [Berndt, 1988]. Los sensores son *piezo-cables*, dispositivos en forma de cable coaxial en los que la capa aislante entre el conductor central y la malla externa está hecha de un material termoplástico con características piezo-eléctricas (el PVDF o *polyvinylidene difluoride* es uno de los más utilizados [Lee et al., 2008]). Las deformaciones y vibraciones del piezo-cable se traducen en variaciones de carga eléctrica en sus terminales, que son transformadas a voltajes con amplificadores de carga.

El comportamiento de piezo-cables instalados en raíles se ha comparado con la de acelerómetros clásicos [Bracciali y Cascini, 1997] con técnicas de *cepstrum* [Oppenheim et al., 1999]. Aunque los resultados obtenidos con los piezo-cables son inferiores, es una alternativa interesante por su inmunidad al ruido EMI.

El sistema GOTCHA® desarrollado por Lloyd's Register Rail y BAAS, puede medir defectos en las ruedas y la carga por eje mientras el tren circula a alta velocidad. El sistema emplea sensores de fibra óptica protegidos en cajas sólidas de metal y dispuestas debajo del carril. Los sensores miden la deflexión vertical del carril cuando pasa el tren. El sistema se calibra utilizando trenes con pesos predefinidos e identificados, garantizando el correcto análisis de los datos [de Graaf et al., 2005]. El sistema GOTCHA instrumenta varias vías ferroviarias en Holanda.

Por último, el sistema MATTILD (*Main Line and Transit Impact Load Detector*), utiliza un láser junto a un detector CCD (*Charge Coupled Device*) para detectar vibraciones inducidas en el carril al paso del tren [Hesser et al., 2005]. En este sistema, el haz láser se defleja como consecuencia de la deformación producida en el rail. El detector CCD mide esta deformación y, el posterior procesamiento de las señales, permite desacoplar la deflexión debida a la carga estática de la presencia de defectos en la superficie de rodadura y en los rodamientos.

1.5.2. Medida de variaciones del radio de la rueda

La medida de las vibraciones mediante alguna de las técnicas descritas anteriormente proporciona una información cualitativa de la presencia de defectos. En particular, resulta difícil determinar el tamaño de un plano o la pérdida de material sufrido por abrasión a partir de dichas medidas.

Para superar este inconveniente, se han ideado técnicas que, midiendo las variaciones de radio de la rueda, permiten detectar y cuantificar la profundidad de planos y errores de ovalización. En

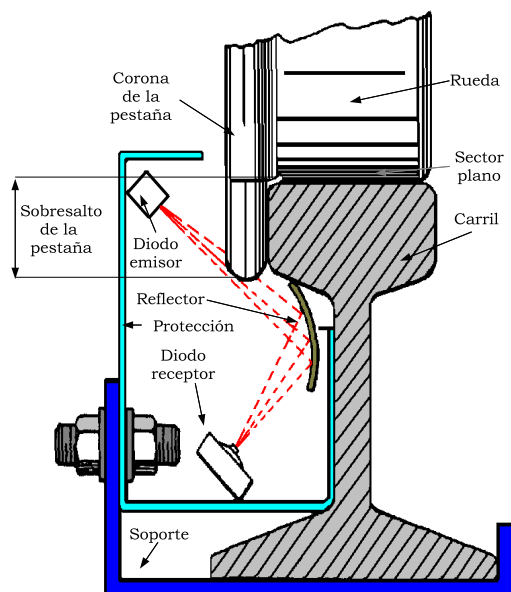


Figura 1.7: Sistema óptico de detección de planos [Gutauskas, 1992].

general, estos sistemas obtienen la diferencia de radios entre el borde de la pestaña y la banda de rodadura. Consideran que la pestaña no sufre desgaste en su borde y que, por tanto, mantiene su radio nominal a lo largo de la vida útil de la rueda. Así la medida proporciona una indicación directa de las variaciones de radio de la rueda en su rotación sobre el puesto de medida. Todos los sistemas son automáticos y dinámicos.

El sistema de inspección patentado por [Gutauskas \[1992\]](#) utiliza un sistema óptico compuesto por múltiples pares de diodos emisores y fotodetectores a lo largo de una longitud mayor que el desarrollo de la rueda (Figura 1.7). La pestaña intercepta parcialmente el haz luminoso del diodo emisor. Cuando la rueda apoya sobre un plano (menor radio), la pestaña baja, enmascarando más el haz luminoso, con lo que el fotodetector da una menor señal.

El método anterior puede tener buena resolución en variaciones de radio, pero resulta costoso si se desea obtener una buena resolución longitudinal (gran número de sensores). Por otra parte los métodos ópticos presentan dificultades en el ambiente ferroviario por problemas de suciedad, grasa, vibraciones, etc.

Para superar estos inconvenientes, también se han ideado sistemas mecánicos. [Feng et al. \[2000\]](#) describen un sistema basado en un pedal accionado por la pestaña de la rueda a su paso. El pedal se forma mediante un paralelogramo soportado por muelles que se sitúa paralelo al carril, siendo éste un parámetro crítico de diseño. El movimiento vertical del pedal se mide con un sensor de desplazamiento, que devuelve una señal en forma de pedestal en la que las irregularidades (planos) se muestran como picos en torno al valor medio. Se requieren, al menos, dos sistemas

iguales para cubrir toda la longitud de la rueda evitando que las dos que pertenecen al mismo bogie entren simultáneamente en el puesto de medida.

El algoritmo de detección de planos [He et al., 2005] se basa en extraer los máximos, mínimos y valor medio de la señal. La presencia de defectos se determina a partir de las singularidades por la superación de un umbral. La precisión de la medida puede llegar a 0.2mm de radio, con trenes circulando a velocidades inferiores a 36Km/h. Debe observarse que esta resolución corresponde a la pérdida de material de un plano nuevo de 27mm de longitud formado en una rueda de 450mm de radio nominal, por lo que resulta demasiado ajustada para detectar y cuantificar planos críticos (50mm de longitud es el límite establecido en España [Baeza et al., 2006a]).

Control del perfil de la rueda por medios ópticos

La disponibilidad de tecnología láser, detectores lineales y matriciales y cámaras de alta velocidad, ha permitido desarrollar sistemas de visión artificial para localizar ciertos defectos en las ruedas de trenes de forma dinámica y automática. Desde el punto de vista del desgaste, los parámetros esenciales en el perfil de la rueda son la altura y anchura de la pestaña y el espesor de la llanta. Los sistemas ópticos se dirigen especialmente a medir estos parámetros críticos y, simultáneamente, a determinar el desgaste no uniforme de la banda de rodadura.

Sin embargo, una de las primeras técnicas propuestas con estos objetivos no utilizaba medios ópticos, sino magnéticos [Noble, 1979]. El sistema utiliza múltiples detectores magnéticos colocados en un lateral del carril a diferentes alturas. Al pasar la rueda, los detectores determinan el tiempo de tránsito de diferentes cuerdas en las circunferencias determinadas por la pestaña y llanta, obteniendo por geometría sus diámetros. Sin embargo, este sistema no puede ofrecer medidas suficientemente precisas y, además, requiere un bajo entrehierro entre detector y rueda, lo que puede resultar problemático por razones de gálibo. Un principio similar se ha utilizado para determinar el diámetro de la rueda utilizando 4 barreras ópticas [Wittkopp et al., 1989], lo que permite superar el problema anterior.

En otra realización, se utilizan punteros láser a ambos lados del contacto rueda-carril para producir puntos brillantes sobre la superficie de rodadura a una cierta altura. Con cámaras se obtienen las correspondientes imágenes, que definen una cuerda en la circunferencia, cuyo diámetro puede obtenerse por simple geometría [Obrig et al., 1989].

Una alternativa utiliza medidores láser de distancia, que pueden ubicarse a decenas de cm del objeto a medir (rueda). Estos dispositivos están formados por un emisor láser puntual y un receptor situado lateralmente, a una distancia conocida. El desplazamiento de la imagen del punto reflejado en un detector óptico lineal proporciona una medida precisa de distancia por triangulación. La combinación de varios medidores de distancia facilita la obtención del diámetro de la rueda, pestaña y llanta y, por consiguiente, una medida del nivel de desgaste de la rueda

[Danneskiold-Samsøe, 1990]. La técnica fue, posteriormente, mejorada con la incorporación de cámaras CCD y técnicas de procesamiento de imagen [Danneskiold-Samsøe et al., 1993].

Sin embargo, los medidores puntuales de distancia no proporcionan información precisa del perfil de la rueda, un aspecto importante por los diferentes grados de desgaste de la banda de rodadura y de su encuentro con la pestaña. Para mejorar el nivel de información, las medidas se deben realizar en múltiples puntos de la banda de rodadura. Así, se propuso la utilización de múltiples emisores láser que proyectan puntos luminosos sobre la banda de rodadura en un plano que pasa por el eje de la rueda. La imagen formada se captura con cámaras CCD y, tras su procesamiento, se obtienen los correspondientes radios desde el centro de la rueda [Vanaki, 1998]. En otros casos, se realiza un barrido del haz láser sincronizado con la adquisición de la imagen en el sensor [Mian y Hubin, 1997]. Un principio similar, pero con emisores y cámaras situados a ambos lados del carril ha sido propuesto por Mian et al. [2004]. Son sistemas de medida discreto en varios puntos de la superficie de rodadura o de los laterales de las ruedas.

El sistema descrito por Sánchez-Revuelta y Gomez [1998] utiliza un haz láser plano, que intersecta la superficie de rodadura con un ángulo determinado. Un conjunto se monta debajo de la rueda, utilizando un rail más estrecho o haciendo rodar la rueda por la pestaña, de forma que deje visible la banda de rodadura. La imagen de la intersección del plano láser con la banda de rodadura se obtiene con una cámara CCD en una zona con mínima velocidad de desplazamiento, lo que facilita obtener el perfil de la rueda con alta resolución. Una mejora posterior de esta técnica permite, además, obtener imágenes a ambos lados de la rueda, proporcionando una vista completa del perfil [Sánchez-Revuelta et al., 2003].

Buena parte de las ideas descritas ha sido llevada a la práctica con éxito, existiendo diversas realizaciones comerciales. Así, el sistema de visión *TreadVIEWTM* desarrollado por AEA Technology Rail, verifica los perfiles de las ruedas mientras el tren circula a una velocidad entre 5-6mph (Figura 1.8). El sistema se compone de un conjunto de cámaras y láseres dispuestos por debajo y a los lados de la vía. Las imágenes se capturan en el momento que el perfil de la rueda corta la línea trazada por el láser, enviándose a un ordenador central que ejecuta el software de análisis de imágenes. Las imágenes procesadas, permiten conocer el estado del perfil de la rueda, alto y espesor de la pestaña y conicidad [Nicks, 1998; Thanh y Stirling, 2003]. Sin embargo, el sistema tuvo problemas al utilizarlo en un ambiente hostil [Davis, 2001].

En Estados Unidos, la compañía BeenaVision Systems, Inc. desarrolló la tecnología *Wheel-ViewTM*. Este sistema mide diferentes parámetros del perfil de la rueda a altas velocidades de circulación (hasta 120mph). Otro caso es el sistema de inspección de ruedas automático (*Automatic Wheel Inspection System*, AWIS), desarrollado conjuntamente por la Compañía Ferroviaria BSNF y la empresa LORAM. El sistema emplea un láser proyectado por un conjunto de ópticas formando un plano; cuando el plano es cortado por una rueda, se produce una línea de luz sobre la llanta. Una cámara digital con tiempo de exposición muy corto captura la imagen en este instante para su posterior procesamiento, midiendo la altura y espesor de la pestaña, anchura y estado de la llanta y sección transversal del perfil de la rueda. El sistema puede operar



Figura 1.8: Sistema de inspección óptica *TreadVIEW™* (fotos: [Vision Systems](#), [MATROX](#)).

con el tren circulando hasta 70Km/h [[Brekke, 1996](#); [Leedham y Nelson, 1995](#)].

El mayor problema asociado a los sistemas ópticos es su fragilidad, necesidad de ambiente limpio y libre de vibraciones [[Burkhardt et al., 2007](#)]. Por otra parte, aunque los sistemas de medida de perfil de las ruedas son fundamentales para garantizar la seguridad y evaluar su desgaste, no son adecuados para detectar y cuantificar defectos de tipo local, como son los planos, coqueras y grietas.

1.5.3. Técnicas ultrasónicas

Descripción general de la tecnología

Los ultrasonidos son ondas mecánicas de alta frecuencia ($>20\text{KHz}$) que se propagan en medios materiales. Se utilizan en Evaluación No Destructiva (END) como señales exploratorias para detectar cambios de impedancia acústica en el medio en que se propagan (producto de la velocidad de propagación por la densidad del medio). Un cambio brusco de impedancia acústica (una grieta, por ejemplo), produce una señal de eco indicativa de la presencia del defecto.

En este tipo de aplicaciones, el mismo transductor emite pulsos ultrasónicos y recibe los ecos generados (operación en *pulso-eco*). En otros casos, se utiliza un transductor emisor y otro receptor (en *transmisión*), detectando los defectos por cambios de intensidad en la señal recibida

o por indicaciones de eco en el receptor (modo *pitch-catch*).

Los ultrasonidos de alta frecuencia ($>200\text{KHz}$) se atenúan rápidamente en medios gaseosos (aire) donde, además, existe una enorme desadaptación de impedancias entre el aire y sólidos (transductor y pieza), lo que conduce a grandes pérdidas de inserción ($>100\text{dB}$). Por esta razón, los transductores requieren un medio acoplante interpuesto (agua, plástico, goma, etc.) para insonificar el material de interés o, alternativamente, se sitúan en contacto directo con la pieza a inspeccionar mediante una capa de adaptación de impedancias acústicas.

Los ultrasonidos se pueden generar con distintos tipos de transductores, entre ellos:

Piezoeléctricos: en los que un material que presenta este efecto produce vibraciones mecánicas con una excitación eléctrica y convierte vibraciones mecánicas en señales eléctricas. Normalmente se utilizan cerámicas de tipo PZT (titanato-circonato de plomo) por su mayor eficiencia, pero existen otros compuestos sintéticos y naturales (cuarzo, por ejemplo). Actualmente buena parte de los transductores piezoeléctricos se realizan en composición con una matriz epoxi (piezocomposites) por su mayor eficiencia y ancho de banda [Meyer et al., 2004]. Su impedancia acústica es similar a la de otros sólidos, por lo que puede obtenerse un buen acoplamiento directo transductor-pieza. En otros casos se utiliza con acoplamiento de agua (en tanque o mediante un chorro) o suelas de plástico o goma. Esta tecnología es la de uso más frecuente en aplicaciones ferroviarias y en otros ámbitos.

EMAT (Electro-magnetic acoustic transducer): producen oscilaciones mecánicas por la fuerza de Lorentz que aparece al hacer circular una corriente oscilante en un campo magnético. La corriente oscilante se induce en el material (corriente de Eddy) mediante una bobina [Aliouane et al., 2000]. No requieren contacto ni acoplante, ya que generan el ultrasonido directamente en el material, que debe ser conductor. Asimismo, permiten obtener distintos modos de propagación [Samokrutov et al., 2006], aunque tienen una sensibilidad menor que los piezoeléctricos. Son utilizados con frecuencia en el ámbito ferroviario.

LAHUT (Laser-air hibrid ultrasound transducer): en este caso se utiliza un láser de potencia pulsado que, por efectos térmicos, genera ultrasonidos en el material impactado [Wang et al., 2008]. En recepción, se utiliza un láser continuo de baja intensidad y un interferómetro. Es una tecnología costosa y de ajuste delicado, pero no requiere ningún medio acoplante. También se ha utilizado en el ámbito ferroviario.

Ultrasonidos en aire: algunos termoplásticos, como el ya mencionado PVDF, tienen características piezoeléctricas. Otros materiales, como EMFI (*ElectroMechanical Film*) se comportan como ferroelectretos con capacidad para generar y recibir ultrasonidos [Ealo et al., 2008]. Estos materiales tienen una buena adaptación de impedancia

acústica al aire, pero sus niveles de energía son actualmente demasiado bajos para su utilización en aplicaciones de END en el interior de materiales sólidos.

Modos de propagación

En sólidos, los ultrasonidos presentan diversos modos de propagación en función de la forma de vibración de las partículas del material. En sólidos infinitos sólo pueden existir ondas longitudinales o transversales y los restantes modos surgen como consecuencia de límites geométricos a la propagación (confinamiento) [Krautkrämer y Krautkrämer, 1990]:

Ondas longitudinales (o de compresión): las partículas vibran en la dirección de propagación y son las únicas que pueden formarse en medios líquidos y gaseosos.

Ondas transversales (o de corte): las partículas vibran en una dirección normal a la de propagación (*shear waves*).

Ondas de Rayleigh: son ondas superficiales que se producen en un material semi-infinito, con una penetración en el material del orden de una longitud de onda, donde las partículas vibran siguiendo trayectorias elípticas.

Ondas de Lamb: se producen cuando se introduce una segunda superficie límite (una placa, por ejemplo). Producen vibraciones simétricas o antisimétricas en placas con un espesor de varias longitudes de onda y las partículas vibran con trayectoria elíptica.

Las ondas transversales se generan, habitualmente, partiendo de un transductor que emite ondas longitudinales en un medio con velocidad de propagación c_{L1} con un ángulo β_1 respecto a la normal a la superficie del medio a inspeccionar, donde la velocidad de propagación de la onda transversal es c_T . La refracción en la interfase verifica la ley de Snell:

$$\frac{\sin\beta_1}{c_{L1}} = \frac{\sin\beta_2}{c_T} \quad (1.5.1)$$

donde β_2 es el ángulo refractado en el segundo medio. Eligiendo $\sin\beta_2 > c_{L1}/c_{L2}$, con c_{L2} igual a la velocidad de las ondas longitudinales en el segundo medio, se evita su propagación ya que produce $\sin\beta_1 > 1$. De este modo, no se mezclan las indicaciones de las ondas transversales y longitudinales. Por otra parte, si en (1.5.1) se hace $\beta_2 = 90^\circ$ y se sustituye c_T por c (velocidad de propagación de las ondas de Rayleigh en el segundo medio), se obtienen ondas superficiales o de Rayleigh.

Las velocidades de propagación de los diferentes modos son distintas y están determinadas por el módulo de Young E , la densidad ρ y el coeficiente de Poisson ν del material. Para las ondas longitudinales [Bray et al., 1973]:

$$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (1.5.2)$$

Las ondas transversales se propagan con una velocidad:

$$c_T = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\nu)}} \quad (1.5.3)$$

En acero, $E \approx 200\text{GPa}$, $\nu \approx 0.3$, $\rho \approx 7.85\text{g/cm}^3$, con lo que sustituyendo en las ecuaciones anteriores se obtiene $c_L \approx 5.85 \cdot 10^3\text{m/s}$, $c_T \approx 3.13 \cdot 10^3\text{m/s}$, esto es, la velocidad de las ondas transversales es aproximadamente igual a la mitad de la de las longitudinales.

La velocidad de las ondas de Rayleigh c en superficies planas es función de c_L y c_T . Llamando $\zeta = (c/c_T)^2$ y $\delta = c_T/c_L$, se debe verificar la siguiente ecuación:

$$\zeta^3 - 8\zeta^2 + (24 - 16\delta^2)\zeta + 16(\delta^2 - 1) = 0 \quad (1.5.4)$$

Para el acero, $\delta = 0.535$ y, resolviendo (1.5.4), se obtiene $\zeta = 0.859$, con lo que $c = c_T \zeta^{1/2} = 2.9 \cdot 10^3\text{m/s}$. Esto es, la velocidad de la onda superficial de Rayleigh es ligeramente inferior a la de la onda transversal.

La velocidad de las ondas de Lamb depende de la frecuencia f (son ondas dispersivas) y, en particular, de la relación entre el espesor e de la placa y la longitud de onda $\lambda = c_{Lamb}/f$. Salvo en el caso de geometrías muy simples, no existe una solución analítica cerrada y c_{Lamb} debe calcularse por métodos numéricos para cada frecuencia. Las ondas pueden ser simétricas en torno al plano medio de la placa o antisimétricas y, además, pueden coexistir múltiples modos a partir de cierta frecuencia de corte inferior que es función de e/λ .

Cuando la placa no es infinita sino, por ejemplo, una barra prismática, aparecen nuevos modos de ondas dispersivas, con sus respectivas componentes. En muchas aplicaciones y, en particular en la técnica de medida propuesta en esta Tesis Doctoral, coexisten múltiples modos de propagación, cada uno con su velocidad, lo que produce múltiples indicaciones. Este es uno de los problemas que ha habido que superar con la alternativa que se propone en este trabajo de Tesis Doctoral.

1.5.4. Detección ultrasónica de defectos en ruedas de tren

Desde hace décadas se utilizan técnicas ultrasónicas para la inspección de ruedas y otro material ferroviario. Las primeras especificaciones fueron implementadas por la AAR a finales de los años 60, definiendo defectos en velo y llanta [Lonsdale y Meyer, 2000].

Defectos en la superficie de rodadura

En 1973 Bray et al. demostraron la capacidad de las ondas de Rayleigh para detectar defectos en la banda de rodadura de modelos de ruedas de tren a 1/4 de escala. Observaron que la onda de Rayleigh podía ser detectada tras dar 4-10 vueltas a la circunferencia, lo que facilitaría la detección midiendo el cambio de atenuación de la onda en cada vuelta a la rueda. Sin embargo, esta técnica sólo es práctica con ruedas nuevas, resultando difícil establecer patrones de atenuación en ruedas desgastadas y con pequeños defectos superficiales debidos a la fatiga de rodadura.

Este principio ha sido utilizado para la detección de defectos superficiales mediante transductores ultrasónicos montados en un rail bajo la superficie de rodadura con el tren en marcha. Los transductores pueden ser de distinto tipo (piezoeléctricos, EMAT o láser), pero en todos los casos generan ondas de Rayleigh (superficiales) que viajan por la periferia de la rueda (banda de rodadura y pestaña).

Una propuesta utiliza dos transductores piezoeléctricos en transmisión, orientados para generar y recibir ondas de Rayleigh [Corwan et al., 1976]. Para cada rueda se disponen dos sistemas de medida ligeramente separados, en los que las señales se hacen circular en direcciones opuestas, de forma que puedan analizarse las indicaciones en cada vuelta del pulso ultrasónico por la periferia de la rueda. Midiendo los tiempos de vuelo por la banda de rodadura y por la pestaña (desde la emisión a la recepción de la primera y segunda indicación, respectivamente), es posible determinar el diámetro y el grado de desgaste de la rueda.

Otros trabajos utilizan el mismo principio, sustituyendo los transductores piezoeléctricos por EMATs alojados en un cajado abierto en el rail [Fan y Jia, 2008; Salzburger et al., 2008]. Esta tecnología también se ha utilizado para realizar sistemas de inspección manual [Mian, 2004]. Asimismo, se han desarrollado sistemas en los que la onda superficial se induce en la banda de rodadura mediante un haz láser de potencia, registrándose los ecos con transductores ultrasónicos para aire (LAHUT) [Kenderian et al., 2006]. La ventaja del sistema es que, como en el caso de los EMATs, no se requiere contacto físico ni acoplamiento especial entre la rueda y los transductores. Sin embargo estas técnicas pueden presentar problemas cuando las ruedas muestren múltiples defectos de fatiga por contacto, precisamente cuando las fracturas pueden ser más críticas, por la mayor atenuación a las ondas superficiales y la menor sensibilidad de EMAT y LAHUT en recepción [Diedrich, 1998].

Por otra parte, se ha demostrado que, utilizando un único transductor piezoeléctrico, se pueden recibir señales en ambos sentidos, transmisión y pulso-eco, con ondas de Rayleigh generadas en la banda de rodadura por contacto y en seco mediante una suela de goma [Ibañez et al., 2002b, 2005]. Esta tecnología ofrece ventajas por la mayor sensibilidad de los transductores piezoeléctricos y por la redundancia de las indicaciones en los dos sentidos de giro del pulso ultrasónico. La incorporación de técnicas de procesamiento de señal, posteriores a su adquisición, permite diferenciar claramente las indicaciones recibidas que corresponden a vueltas completas de rueda del pulso ultrasónico, de otras correspondientes a defectos en la superficie de rodadura (hasta 4mm de profundidad). Esta idea ha sido incorporada por Patentes Talgo a su tecnología de mantenimiento de trenes como sistema de detección DSR (Figura 1.9) [Ibañez et al., 2002a].

Estos sistemas son adecuados para detectar grietas en sentido axial y no tanto para otras orientaciones. Además es muy difícil discernir el tipo de defecto causante de la indicación y estimar su tamaño. Tampoco permiten la detección de planos, pues éstos no presentan cambios suficientes de impedancia acústica en la propagación de la onda superficial por la banda de rodadura.

Defectos en el volumen de la rueda

Para los defectos en el velo y llanta se han desarrollado normas de inspección, particularmente para ruedas nuevas, con diferentes grados de exigencia. Las normas establecen el tamaño crítico de defectos internos equivalentes a un taladro de fondo plano. En general, estas normas (UIC812, ISO4958, AAR, EN13262, DBTL, BS5892 y RD32.144) requieren que las indicaciones de los defectos internos estén por debajo de las de los taladros de 1 a 3mm, en función del destino de la rueda [NDT Systems & Services AG], siendo más exigentes (1mm) para ruedas de trenes de alta velocidad. Las normas tienen en cuenta la zona ciega de 20-30mm que se produce por la interfaz de la banda de rodadura.

Con frecuencia la inspección se realiza con ruedas desmontadas, generalmente en inmersión. Para ello, se disponen uno o más transductores mono-elemento que introducen el sonido en la rueda a través de la banda de rodadura, principalmente para detectar defectos en sentido tangencial [Prorok et al., 1999]. La rueda se hace girar mientras que los transductores se desplazan en dirección axial, facilitando la inspección del volumen de la llanta y velo. Esta técnica se utiliza en la estación desarrollada por Railway Technology para inspeccionar ruedas montadas en el bogie (Figura 1.10), con los transductores operando en pulso-eco.

Una técnica alternativa emplea pares de transductores ultrasónicos en contacto directo con la superficie de rodadura, operando en *pitch-catch*, para detectar defectos en sentido tangencial en el velo de la rueda [Pohl et al., 2004]. La distancia entre ambos transductores limita el rango de profundidades a las que estos defectos son detectables, lo que hace necesario el empleo de múltiples pares de transductores para evaluar todo el velo. Por su parte, las grietas en sentido radial se detectan por pulso-eco con transductores angulares.



(a) Instalación del sistema para la detección de defectos superficiales en la banda de rodadura.



(b) Transductor piezoeléctrico utilizado por el sistema para generar y recibir ondas superficiales.

Figura 1.9: Sistema de detección DSR (foto: [Talgo](#)).

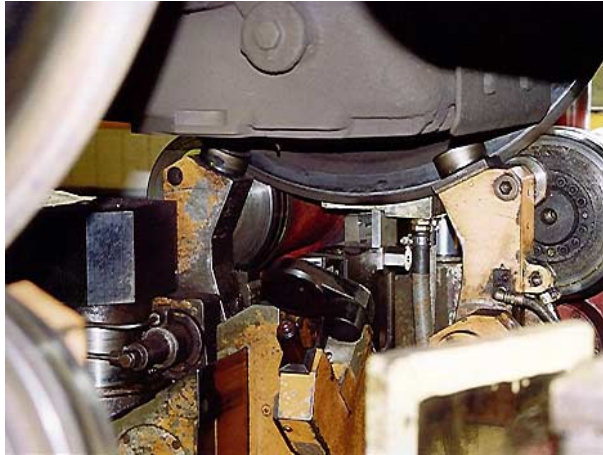


Figura 1.10: Sistema de inspección de ruedas por US con plataforma mecánica (foto: [Railway Technology](#)).

Para la evaluación de ruedas en servicio, la compañía alemana de ferrocarriles (DB AG) retira y tornea las ruedas cada 250,000Km (reperfilado). Tras el torneado, las ruedas se inspeccionan con la estación AURA [[Kappes et al., 2006](#); [Rockstroh et al., 2006](#)]. Este sistema utiliza unos cabezales con múltiples transductores monoelemento, con diversas orientaciones para detectar defectos en el interior. Para detectar grietas superficiales, utiliza sensores de corrientes inducidas. Aunque el sistema es relativamente rápido para realizar las medidas, la necesidad de desmontar las ruedas supone un coste muy elevado.

Por esta razón la DB ha instalado el sistema UPFE, que permite verificar el estado de las ruedas sin desmontarlas [[Rockstroh et al., 2008](#); [Schuhmacher et al., 2004](#)]. En este caso el eje se levanta por medios hidráulicos, liberándolo del contacto con el carril, y se hace girar por medio de rodillos. Un brazo articulado con múltiples transductores ultrasónicos se coloca en contacto con la superficie de rodadura, realizando la inspección. El posterior procesamiento de los datos adquiridos permite detectar una gran diversidad de defectos internos.

En España se han desarrollado dos sistemas alternativos con una mecánica más sencilla que garantiza un buen acoplamiento del ultrasonido a la rueda. Por una parte, la empresa [Interlab](#) ha desarrollado el sistema ULTRASEN, formado por dos subconjuntos de tres transductores ultrasónicos, uno por cada rueda de un mismo eje. Como en el caso anterior el eje se eleva por medios hidráulicos y se hace girar mediante rodillos. En cada subconjunto uno de los transductores tiene orientación radial y los otros dos angular. Esta disposición permite verificar la presencia de grietas en el velo, particularmente en los taladros de sujeción de los frenos de disco [[García et al., 2004](#)].

Por otra parte, la empresa Dano-Rail ha desarrollado, junto con nuestro grupo en el CSIC, un sistema de inspección de velo y llanta con técnicas de phased-array (DO100VR) [[Parrilla et](#)

al., 2006]. Esta tecnología permite realizar la deflexión y focalización electrónica del haz ultrasónico, facilitando la obtención de imágenes acústicas sectoriales. En una revolución de la rueda, se adquieren 360 imágenes, realizándose un posterior procesamiento para detectar defectos en velo y llanta [Parrilla et al., 2008]. La técnica es muy robusta, pues permite detectar los defectos desde múltiples direcciones (opera con redundancia) y, además, es independiente de la orientación de las grietas. La utilización de la tecnología de *phased array* para inspeccionar la llanta de ruedas de tren fue propuesta por [Lonsdale et al., 2001; Lonsdale y Meyer, 2000]. Estos sistemas son rápidos, pues no requieren desmontar las ruedas para su inspección volumétrica, aunque el tren debe posicionarse con cierta precisión para situar cada eje sobre el puesto de medida. Idealmente, la inspección debería realizarse con el tren en marcha (lenta) y de forma automática, existiendo algunas propuestas.

Kroening et al. [2002] han propuesto instrumentar un carril con múltiples transductores de tipo EMAT, a intervalos pequeños. Los transductores tienen sensores de presión que detectan cuándo la rueda está situada justo encima de un subconjunto de transductores. En este momento se realiza un disparo coordinado (al estilo de un *phased array*) generando ondas transversales que penetran en la llanta y velo con un ángulo determinado. Sin embargo, además de la complejidad y coste de esta alternativa, una distancia superior a media longitud de onda entre los transductores (1.5mm a 1MHz) producirá lóbulos de rejilla [Kino, 1987]. Como consecuencia, se formarían múltiples haces ultrasónicos en otras tantas direcciones cuyas indicaciones imposibilitarían la localización de defectos.

Más recientemente se ha propuesto otra técnica, en la que los transductores se montan sobre un carro que discurre por un carril paralelo a los raíles por los que circula el tren a muy baja velocidad [Pagano y Giragosian, 2009]. Un sistema de seguimiento de la rueda controla el movimiento del carro, en el que se montan varios transductores ultrasónicos en inmersión parcial (usando chorros de agua). El sistema realiza adquisiciones de señal ultrasónica a lo largo de una longitud equivalente a la circunferencia de la rueda, en varios sectores de 1/4 de vuelta (se montan 4 sistemas para cubrir los 360° de la rueda). Cada carro regresa a su posición inicial al finalizar su sector. El procesamiento de estas señales permite detectar defectos en el interior de la llanta y en la banda de rodadura.

Técnicas ultrasónicas basadas en el efecto Doppler

Idealmente, la inspección y detección de defectos en ruedas debe hacerse con el tren en movimiento. Sólo las técnicas de medida de impactos y algunos ópticos consideran el movimiento del tren para realizar esta operación. Con la tecnología ultrasónica parece interesante explotar la situación de movimiento de la rueda para detectar defectos utilizando el efecto Doppler. Sin embargo, hasta la fecha, apenas ha habido propuestas desde este punto de vista.

Una notable excepción es el trabajo de Wooh [2000] para detectar grietas en la superficie de

un disco rotando a alta velocidad. En este caso se utilizan dos transductores ultrasónicos para aire, operando en onda continua a 100KHz. El desplazamiento de frecuencia Doppler es proporcional a la relación entre la velocidad del móvil y la velocidad de propagación de la señal ultrasónica. Con una velocidad tangencial del disco de 28.6m/s (103Km/h) y en aire ($c = 340\text{m/s}$), la desviación de frecuencia Doppler es de unos 8KHz, pudiendo detectarse mediante análisis de Fourier o filtros paso-banda. Los resultados muestran la capacidad del método para detectar grietas de tan sólo 0.1mm en la superficie pulida del disco.

Esta misma técnica fue propuesta para detectar defectos en los raíles, instrumentando un vehículo con transductores acústicos sin contacto [Wooh, 2001]. Para ello, utiliza un par de transductores ultrasónicos para aire (piezoeléctricos, láser o EMAT), uno como emisor hacia el carril y otro como receptor de la señal que éste produce por reflexión especular. En principio, dada la gran desadaptación de impedancia acústica aire-acero, la técnica sólo es útil para detectar defectos superficiales, que también son detectables mediante métodos convencionales en pulso-eco.

Un intento alternativo ha sido investigado por el autor en su trabajo tutelado [Brizuela, 2007]. En este caso se pretende detectar la presencia de planos en ruedas de tren en movimiento haciendo uso del efecto Doppler. La idea es que, cuando la rueda se mueve sobre su parte circular, el punto de contacto rueda-carril se desplaza a la velocidad del tren respecto a una referencia fija en el carril. Al llegar a un plano u otra discontinuidad, la velocidad instantánea del punto de contacto varía. Por ejemplo, en un plano nuevo, el punto de contacto rueda-carril se detiene un cierto tiempo mientras que la rueda pivota sobre el primer borde del plano, volviendo a obtener la velocidad nominal tras pivotar sobre el segundo. Para un plano de 40mm y un tren desplazándose a 3m/s (9.6Km/h) el tiempo en el que el punto de contacto está detenido es de 13.3ms, perfectamente medible.

Para su realización, el trabajo propone enviar una onda continua superficial mediante un transductor emisor acoplado al carril. La señal de eco producida por el contacto rueda-carril se detecta por otro transductor receptor. En este caso las variaciones de frecuencia son mucho menores ya que la velocidad de propagación de las ondas superficiales es de unos $3 \cdot 10^3\text{m/s}$ (variaciones de frecuencia del orden del 0.1 %). El trabajo obtuvo resultados experimentales que permitieron detectar varios defectos practicados en ruedas a escala. Sin embargo, para cuantificar la longitud del defecto, es necesaria una buena resolución temporal. Por otra parte, para discriminar el desplazamiento Doppler, es necesaria una buena resolución en frecuencia. No es posible satisfacer simultáneamente ambos criterios, teniendo que adoptarse una solución de compromiso. Una conclusión de este trabajo fue que resultaba eficaz para detectar planos, pero su cuantificación resultaba problemática [Brizuela et al., 2009, 2010].

1.6. Discusión y conclusiones

Los planos producidos por abrasión en la superficie de rodadura de las ruedas de tren están en el origen de otros defectos en el material rodante (grietas, desprendimiento de material, rodamientos, etc.) y en las vías por las grandes fuerzas de impacto que producen. Su pronta detección es muy importante, particularmente en los trenes con mayores demandas mecánicas, como son los de alta velocidad, cercanías, tranvías, metro ligero y carga. Para ello es necesario disponer de medios automáticos que faciliten la detección de este tipo de defectos sin necesidad de detener el tren, por ejemplo a la entrada de un puesto de mantenimiento rutinario con una alta frecuencia de paso (como el punto de lavado diario). En otro caso, dado que las operaciones programadas de mantenimiento se realizan cada 100,000 a 300,000Km es probable que, en el intervalo, los planos hayan causado daños mayores.

Del análisis de las técnicas de inspección conocidas se deduce:

- ✧ Los métodos basados en la medida de cargas y vibraciones permiten detectar la presencia de planos con el tren en movimiento. Estas técnicas son sensibles, al mismo tiempo, a otros posibles defectos en los rodamientos y su discriminación requiere de otras técnicas. Por otra parte no dan ninguna medida cuantitativa del tamaño de la irregularidad, sino indirecta a través de los niveles de los impactos. Estos, a su vez, están influenciados por la posición relativa del plano respecto al detector y de otras ruedas en el mismo bogie.
- ✧ Los métodos basados en medidas geométricas directas, que comparan radios de la pestaña y banda de rodadura mediante sistemas ópticos ó mecánicos, son eficaces para la detección y cuantificación de planos. Sin embargo, la precisión de la medida depende de una mecánica bien ajustada, mantenida en toda la longitud. Los datos reportados en la literatura indican una resolución de 0.2mm en radio, que corresponde a un plano de 27mm de longitud en una rueda de 450mm de radio. Esta resolución es insuficiente para evaluar planos que son críticos a partir de 30-50mm de longitud.
- ✧ Las medidas de planos con técnicas Doppler utilizadas por el autor permiten su detección, pero es problemático determinar cuantitativamente su longitud por la incertidumbre tiempo-frecuencia.
- ✧ El resto de técnicas de inspección descritas (métodos ópticos, medidas de perfil y técnicas ultrasónicas) ni siquiera permiten la detección de planos ubicados en cualquier parte de la superficie de rodadura.

Por consiguiente, la detección y medida de planos en la superficie de rodadura con trenes en marcha y suficiente resolución es un problema que sigue pendiente. El trabajo presentado en esta memoria de Tesis Doctoral aborda este problema mediante una técnica innovadora que se describe en los próximos capítulos.

Una nueva técnica dinámica de detección y medida de planos en ruedas

En este capítulo se aborda el problema de detección y medida dinámica de planos en ruedas ferroviarias mediante un enfoque muy diferente al utilizado en otras alternativas, descritas en el capítulo anterior. En este caso se utiliza una técnica ultrasónica basada en "analizar la cinemática del punto de contacto de la rueda en un carril de medida". Como se demostrará, el punto de contacto rueda-carril muestra variaciones de velocidad como consecuencia de la presencia de irregularidades en la banda de rodadura y, en particular, de planos.

Una aportación esencial para este trabajo es la formulación del "teorema de la pérdida de radio", que permite dimensionar planos y otras irregularidades a partir de medidas del tiempo de vuelo del pulso ultrasónico. Un aspecto importante de este teorema es su robustez frente al ruido y al nivel de desgaste de la rueda y de la irregularidad. De dicho teorema se derivan corolarios que facilitan la aplicación en condiciones reales. Estos resultados se contrastan en este capítulo por simulación, utilizando un modelo geométrico de plano degenerado basado en una función haversine.

2.1. Descripción de la técnica

A modo de introducción intuitiva, cuando un móvil circular rueda sobre una superficie plana sin deslizamiento, el punto de contacto o centro instantáneo de rotación se mueve a la misma velocidad lineal que el móvil. Pero, si la geometría del móvil no es perfectamente circular, la velocidad de traslación del punto de contacto deja de ser igual a la del móvil. Por consiguiente, las variaciones de velocidad del punto de contacto pueden ser utilizadas para detectar cambios de radio.

En la actual propuesta, para detectar el punto de contacto rueda-carril con el tren en movimiento, se envían ondas ultrasónicas de Rayleigh por la *superficie del carril* de medida, registrándose los ecos producidos por el punto de contacto. Las variaciones de la velocidad de desplazamiento de este eco respecto a la velocidad del tren indican la presencia de irregularidades superficiales o, dicho de otro modo, variaciones en el radio de curvatura de la rueda.

Hasta nuestro conocimiento, la idea de enviar la señal ultrasónica exploratoria por un carril en lugar de por la superficie de la rueda no ha sido intentada con anterioridad para detectar defectos en la superficie de rodadura.

En particular, este método se diferencia netamente de los utilizados para detectar defectos superficiales (grietas) haciendo viajar el pulso ultrasónico por la banda de rodadura, de los que existen múltiples ejemplos [Bray et al., 1973; Corwan et al., 1976; Diedrich, 1998; Fan y Jia, 2008; Ibañez et al., 2002a,b, 2005; Kenderian et al., 2006; Salzburger et al., 2008]. Como se ha descrito, estas técnicas tienen dificultades para detectar la presencia de planos en la banda de rodadura ya que éstos no producen ecos significativos.

En principio, el método propuesto en esta Tesis Doctoral presenta las siguientes ventajas:

- ✧ La técnica permite detectar planos y otras irregularidades en condiciones dinámicas y, además, dimensionarlos.
- ✧ Al ser una técnica dinámica, el coste de inspección es nulo.
- ✧ La medida se realiza sobre un material perfectamente caracterizado (un carril especial de medida), del que se pueden conocer con precisión todos sus parámetros (velocidad de propagación ultrasónica, coeficiente de atenuación, efectos de dispersión, etc.).
- ✧ Los efectos de la atenuación y velocidad de propagación de la señal ultrasónica en el carril de medida están mejor controlados, que cuando el pulso ultrasónico viaja por la superficie de una rueda que ha sido sometida a desgaste y fatiga de rodamiento.
- ✧ El dispositivo es estático, no existen partes móviles, aprovechándose el propio movimiento del tren para realizar el proceso de medida y análisis.
- ✧ El acoplamiento entre el transductor ultrasónico y el carril de medida puede ser de alta calidad y, además, se mantiene en las mismas condiciones para todas las ruedas.
- ✧ El sistema de medida puede detectar automáticamente la presencia de una rueda en el momento en que se produce un eco de contacto rueda-carril, así como el final de la medición cuando dicho eco se produce a una distancia (tiempo) determinado por la longitud del carril y la velocidad de propagación.

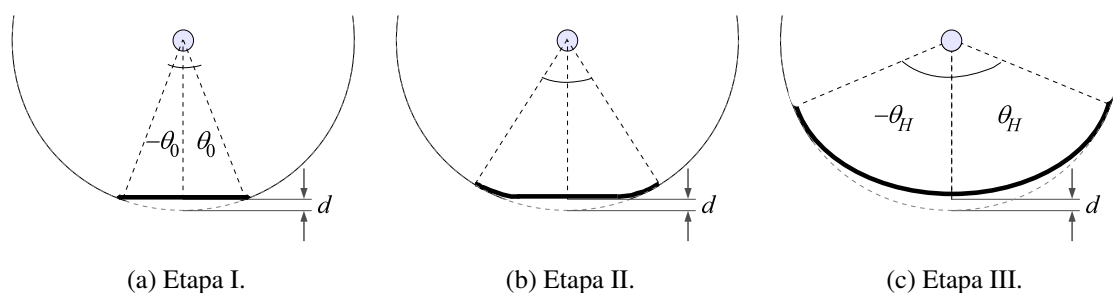


Figura 2.1: Etapas de formación de un plano en la banda de rodadura de una rueda ferroviaria.

- ✧ Esta técnica permite medir con precisión la velocidad del tren, lo que facilita la aceptación o rechazo de las medidas realizadas (válidas dentro de un rango de velocidades).
- ✧ Se adapta bien al ámbito ferroviario, pudiendo trabajar a la intemperie y con condiciones climáticas adversas.

Como se describirá, esta técnica presenta también ciertas dificultades que han sido objeto de estudio y propuesta de solución.

2.2. Evolución de un plano

Una vez formado un plano en la superficie de rodadura, su geometría va a evolucionar por deformaciones plásticas como consecuencia de las mayores presiones y de los impactos que se producen en los bordes al rodar la rueda. Puesto que el sistema de medida que se propone se basa en analizar la cinemática del punto de contacto rueda-carril, es importante estudiar la geometría del plano con distintos grados de desgaste. Obsérvese que, utilizando la terminología ferroviaria al uso, se sigue denominando “plano” a la irregularidad formada, aunque su geometría difiera de la plana original.

En la evolución de la geometría del plano se distinguen tres etapas:

- ✧ **Etapa I.** Un plano recién formado por abrasión provocado por el deslizamiento de una rueda sobre el carril, tiene una forma elíptica plana que, en una vista lateral corresponde a una cuerda de circunferencia que cubre el ángulo $[-\theta_0, \theta_0]$ (Figura 2.1a).

En este proceso ha habido una *pérdida de radio* con una profundidad¹ d . El plano muestra dos bordes nítidos, con una curvatura nula entre ellos. Cada borde del plano representa

¹Distancia también conocida como *flecha*.

una *singularidad* en la que el radio de curvatura es el nominal de la rueda, R , a un lado e ∞ al otro. Esta es una situación inestable que irá degenerando hacia una geometría con una variación continua del radio de curvatura.

- ✧ **Etapa II.** Al continuar la rueda girando con un plano nuevo, éste comienza a desgastarse por los bordes por deformación plástica, tanto debida a las altas presiones como a los sucesivos golpes de impacto en los puntos singulares. La longitud de la irregularidad aumenta, aunque se mantiene la pérdida original de radio d .

En este estado, la curvatura de la rueda ya no es nula en los bordes del plano, pero según ciertos autores [Baeza et al., 2006a; Steenbergen, 2008], se mantiene a cero en las proximidades de su centro (Figura 2.1b). Con este criterio conviven una zona en la que el radio de curvatura es $r(\theta) \geq R$, pero muestra continuidad con el radio de la rueda original, y otra zona plana en la que el radio de curvatura es ∞ . Los puntos singulares se sitúan en la unión de las partes desgastadas curvas con la parte plana.

- ✧ **Etapa III.** El plano se ha desgastado completamente desde los bordes hacia el centro, convirtiéndose en una irregularidad o *plano degenerado* con un radio de curvatura finito $r(\theta) \geq R$ y continuo en todos sus puntos (desaparecen los puntos singulares). Por otra parte, su longitud ha ido aumentando cubriendo un arco de circunferencia $[-\theta_H, \theta_H]$, donde $\theta_H > \theta_0$ (Figura 2.1c).

Esta situación puede considerarse *estable* en el sentido morfológico: no se producen modificaciones geométricas salvo las derivadas del desgaste y escalado. El plano puede seguir aumentando su longitud hasta derivar, eventualmente, en una pérdida de redondez (ovalidad) [Snyder et al., 2003].

2.2.1. Condiciones de estabilidad del perfil

La geometría de un plano degenerado tiende a ser simétrica, pues la rueda gira en ambos sentidos y en las zonas de radio de menor curvatura se ejerce mayor presión con la consiguiente deformación plástica. En este estudio, como en toda la literatura existente, los planos se consideran simétricos respecto a un punto central que se toma como origen de ángulos en un sistema de coordenadas polares con origen en el eje de la rueda. Esta elección de sistema de referencia y la asunción de simetría del plano simplifica mucho la notación y no resta generalidad a los resultados que se obtienen.

Por otra parte, la estabilidad del perfil de un plano degenerado *Etapa III* demanda ciertas condiciones:

- C.1** Un plano degenerado se describe mediante una función continua y convexa del radio desde el origen de coordenadas, $r(\theta)$, que permite la rodadura en todos sus puntos, con ausencia de puntos singulares.

- C.2** Mantiene la máxima reducción de radio d correspondiente a la pérdida de material sufrida al crearse el plano nuevo inicial. Aunque el proceso de desgaste de la rueda va a seguir reduciendo su radio, se considera que es suficientemente lento como para poder considerar aislados ambos fenómenos:

$$r(0) = R - d$$

- C.3** Mantiene en sus bordes continuidad de radio y pendiente con la rueda original, por la hipótesis de estabilidad del perfil (en otro caso se producirían impactos y elevadas presiones que tenderían a suavizar el perfil). Esta condición implica que en los bordes:

$$r(\theta_H) = R \quad \dot{r}(\theta_H) = 0$$

- C.4** El radio r del plano degenerado es en todos sus puntos mayor o igual al mínimo radio en el plano nuevo y menor o igual al radio de la rueda, esto es,

$$R - d \leq r \leq R, \quad -\theta_H \leq \theta \leq \theta_H$$

2.3. Proceso de medida

Un plano degenerado se describe, en coordenadas polares con origen en el centro de la rueda, mediante una función del radio $r(\theta)$ que debe cumplir las condiciones de estabilidad del perfil expresadas anteriormente (Figura 2.2)². En particular, la tercera condición demanda que $r(\theta)$ y su derivada sean funciones continuas incluyendo la circunferencia de la rueda original a partir de los extremos del plano degenerado.

Asimismo se considera que el plano es simétrico a ambos lados, marcándose el centro con un pequeño rombo (♦). En la Figura 2.2 este punto coincide con la proyección del centro de la rueda y la función $r(\theta)$ es simétrica respecto a $\theta = 0$ (eje de ordenadas) entre $-\theta_H$ y $+\theta_H$. Fuera de este rango, la rueda se considera circular de radio R (plano aislado). Por otra parte, se considera que la pérdida de radio d sufrida por abrasión al formarse el plano original se mantiene en el plano degenerado (condición C.2 de estabilidad del perfil).

Suponiendo que no hay deslizamiento entre rueda y carril, el *Centro Instantáneo de Rotación* (CIR) es el punto de contacto Q entre rueda y carril. Cuando la rueda se apoya en la región circular, la proyección P del centro de la rueda sobre el carril coincide con el CIR, como en la Figura 2.2 ($P = Q$).

²Todas las gráficas muestran irregularidades exageradamente grandes para facilitar la descripción.

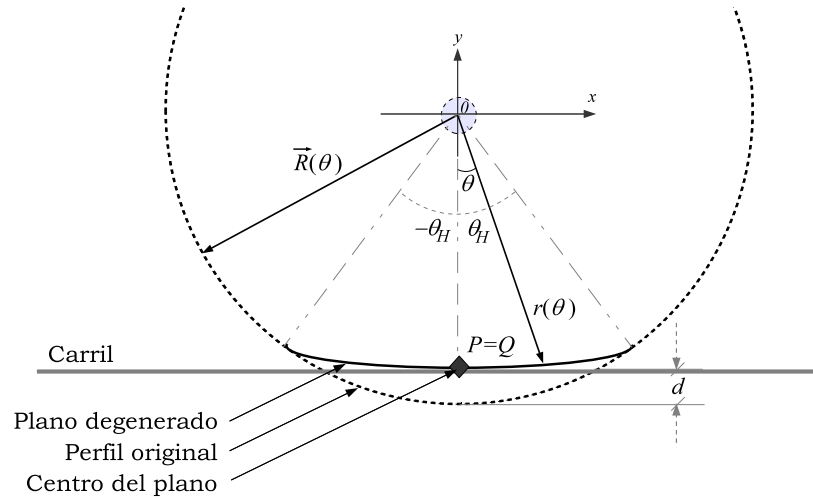


Figura 2.2: Representación geométrica de la rueda original y un plano degenerado, indicando la función $r(\theta)$ en una rueda de radio nominal R , con centro en el origen de coordenadas.

Esto no sucede, en general, cuando la rueda se mueve sobre la irregularidad; el vector \vec{OQ} deja de ser normal al carril y aparece una distancia s entre la proyección del centro de la rueda sobre el carril P y el punto de contacto Q . La Figura 2.3 muestra esta situación, donde se ha hecho rodar el carril por la periferia de la rueda.

El ángulo φ , formado por la proyección P con el eje de ordenadas, representa el giro efectuado por la rueda cuando el punto de contacto se sitúa en Q ; mientras θ es la coordenada polar del punto Q .

Con el sistema de coordenadas fijado en el centro de la rueda y manteniendo el origen de ángulos en el centro del plano, como indican las Figuras 2.2 y 2.3, las coordenadas cartesianas de los puntos de la llanta son:

$$\vec{R}(\theta) = (r(\theta) \sin \theta, -r(\theta) \cos \theta) \quad (2.3.1)$$

El carril siempre es tangente a la rueda en el punto de contacto, y como el vector unitario tangente a la rueda en cada punto es:

$$\vec{t}(\theta) = \frac{\dot{\vec{R}}(\theta)}{\|\dot{\vec{R}}(\theta)\|} \quad (2.3.2)$$

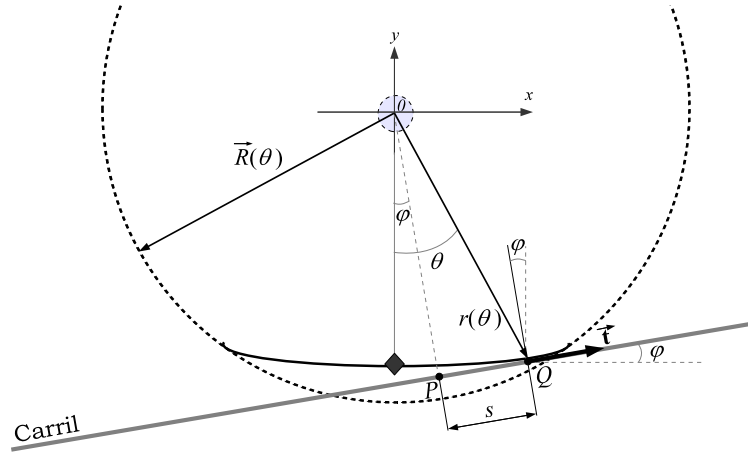


Figura 2.3: Al hacer rodar el carril sobre la irregularidad, el ángulo φ está determinado por la normal a la tangente en el punto de contacto.

$$\vec{t}(\theta) = \frac{(\dot{r}(\theta) \sin \theta + r(\theta) \cos \theta, -\dot{r}(\theta) \cos \theta + r(\theta) \sin \theta)}{\sqrt{\dot{r}(\theta)^2 + r(\theta)^2}} \quad (2.3.3)$$

La distancia s entre el punto de contacto y la proyección del eje sobre carril se obtiene como:

$$s(\theta) = \vec{R}(\theta) \cdot \vec{t}(\theta) \quad (2.3.4)$$

Combinando (2.3.1) y (2.3.3) en (2.3.4); y desarrollando el producto escalar se obtiene³:

$$s = \frac{r \dot{r} \sin^2 \theta + r^2 \sin \theta \cos \theta + r \dot{r} \cos^2 \theta - r^2 \sin \theta \cos \theta}{\sqrt{\dot{r}^2 + r^2}}$$

$$s = \frac{r \dot{r}}{\sqrt{\dot{r}^2 + r^2}} \quad (2.3.5)$$

La última ecuación (2.3.5) proporciona, para cada posición angular θ del punto de contacto, el desplazamiento relativo entre éste y la proyección del centro de la rueda sobre el carril. No obstante, como θ es un ángulo pequeño en el rango $(-\theta_H, \theta_H)$ y las variaciones de radio son también pequeñas ($\dot{r}(\theta) \ll r(\theta)$), puede hacerse la siguiente aproximación:

$$s(\theta) \approx \dot{r}(\theta) \quad (2.3.6)$$

³Se omite la dependencia de r con θ para simplificar la notación.

Por otra parte, por simple geometría de la Figura 2.3 se tiene:

$$s(\theta) = r(\theta) \sin(\theta - \varphi) \quad (2.3.7)$$

ecuación que relaciona la coordenada polar θ con el ángulo de giro φ .

Cuando el punto de contacto se produce en una zona circular, Q coincide con P pues el radio es siempre normal a la tangente ($\varphi \equiv \theta$), con lo que $s = 0$. En los bordes del plano degenerado, por la condición C.3, también es $s(\pm\theta_H) = 0$. Al ser $r(\theta_H) = R \neq 0$, para satisfacer (2.3.7) se tiene:

$$\varphi_H = \theta_H \quad (2.3.8)$$

igualdad que indica que el ángulo de giro en los bordes de un plano degenerado coincide con la coordenada angular.

Cuando la rueda gira un ángulo φ dentro del intervalo de la irregularidad $[-\theta_H, \theta_H]$, el valor de s refleja un adelantamiento o retraso del punto de contacto Q respecto a la proyección P del centro de la rueda sobre el carril. En general:

- ✧ si $-\theta_H < \varphi < 0 \Rightarrow \theta < \varphi$. El valor de s es negativo y representa, en el sistema de coordenadas elegido, un retraso de Q respecto a la proyección P .
- ✧ para $0 < \varphi < \theta_H \Rightarrow \theta > \varphi$, el punto de contacto Q se adelanta a la proyección P y el valor de s es positivo.

En el caso mostrado en la Figura 2.3 se tiene $\varphi > 0$, y el punto de contacto adelanta a la proyección del centro de la rueda (la rueda se mueve hacia $+x$).

Al ser la rueda un sólido rígido, cualquier atraso de Q debe ser compensado por un adelanto posterior. Así, al paso sobre una irregularidad, se tendrá que s muestra una oscilación con un semiciclo negativo seguido de otro positivo. Entre ambos, debe existir un punto en el que $s = 0$, al igual que cuando la rueda circula sobre la parte circular. Esta situación se da en el punto de máxima pérdida de radio donde se tiene $\varphi = \theta = 0$, y por tanto:

$$s(0) = 0 \quad (2.3.9)$$

2.3.1. Relación con la pérdida de radio

Es posible emplear los conceptos anteriores para vincular la pérdida de radio y la longitud del plano original en función de la medida del desplazamiento relativo s .

Considerando que la irregularidad encerrada en el intervalo $[-\theta_H, \theta_H]$ definido alrededor del punto con mayor pérdida de radio, ubicado en $\theta = 0$; el área encerrada bajo $s(\theta)$ es:

$$A = \int_{-\theta_H}^{\theta_H} s(\theta) d\theta = - \int_{-\theta_H}^0 s(\theta) d\theta + \int_0^{\theta_H} s(\theta) d\theta \quad (2.3.10)$$

Sustituyendo por (2.3.6):

$$A \approx - \int_{-\theta_H}^0 \dot{r}(\theta) d\theta + \int_0^{\theta_H} \dot{r}(\theta) d\theta = -r \Big|_{-\theta_H}^0 + r \Big|_0^{\theta_H} = [r(-\theta_H) + r(\theta_H) - 2r(0)] \quad (2.3.11)$$

Por las condiciones C.2 y C.3 de estabilidad del perfil:

$$A \approx [R + R - 2(R - d)] = 2d \quad (2.3.12)$$

La importancia de (2.3.12) reside en que es posible evaluar la pérdida de material d sufrida al formarse el plano original a partir de las medidas de $s(\theta)$. Pero, aunque esta función puede obtenerse por perfilometría a intervalos $\Delta\theta$ constantes, el sistema de medida propuesto obtiene $s(\varphi)$, esto es, el desplazamiento relativo PQ en función del ángulo de giro de la rueda.

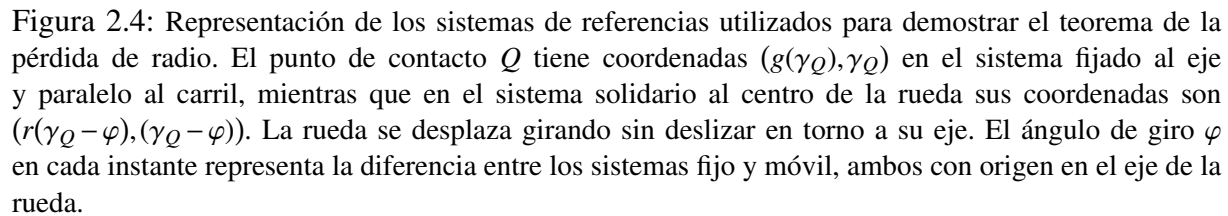
Los resultados anteriores permiten postular un teorema para dimensionar la pérdida de radio y determinar luego la longitud del plano original a partir de la medida del desplazamiento s entre la proyección del eje de la rueda y el punto de contacto en función del ángulo de giro.

Teorema 2.3.1 (Pérdida de radio). *Para irregularidades pequeñas que verifican las condiciones de estabilidad del perfil, el área encerrada por $s(\varphi)$ es igual a 2 veces la pérdida de material d .*

Demostración. El giro de la rueda respecto a su punto de contacto puede describirse siguiendo el esquema de la Figura 2.4 donde se plantean tres sistemas de referencias:

- ✧ Un sistema de coordenadas fijo en el carril de medición.
- ✧ Un sistema ligado al eje de la rueda y paralelo al sistema fijado en el carril.
- ✧ Un sistema de coordenadas solidario al centro de la rueda

La banda de rodadura está descrita en el sistema de coordenadas solidario a la rueda por:



Mientras en el sistema de referencia paralelo al carril de medición y ligado al eje, se tiene:

donde $g(\gamma)$ es la función que describe el radio en este sistema de referencia. Por otra parte, el punto de contacto rueda-carril siempre tiene el mínimo valor de ordenadas $y(\gamma) = g(\gamma) \sin \gamma$ en este mismo sistema. Por tanto el vector al punto de contacto \vec{Q} definido en $\gamma = \gamma_Q$ debe ser tal que para cada valor de ángulo de giro φ cumpla la siguiente condición:

Luego:

Jose David Brizuela

donde de (2.3.14)

$$\frac{\partial g(\gamma)}{\partial \gamma} = \frac{\partial r(\gamma - \varphi)}{\partial \gamma} = \dot{r}(\gamma - \varphi) \quad (2.3.17)$$

Reemplazando (2.3.17) en (2.3.16) se obtiene:

$$\dot{r}(\gamma - \varphi) \sin \gamma = -r(\gamma - \varphi) \cos \gamma \quad (2.3.18)$$

siendo el valor de la tangente en el punto de contacto igual a:

$$\tan \gamma_Q = -\frac{r(\gamma - \varphi)}{\dot{r}(\gamma - \varphi)} \quad (2.3.19)$$

En la Figura 2.4 se observa además que la distancia determinada por el desplazamiento $s(\varphi)$ es la coordenada x , en el sistema ligado al eje, del punto de contacto:

$$s(\varphi) = g(\gamma_Q) \cos \gamma_Q = r(\gamma_Q - \varphi) \cos \gamma_Q \quad (2.3.20)$$

Considerando lo expresado en (2.3.18), se obtiene:

$$s(\varphi) = r(\gamma_Q - \varphi) \cos \gamma_Q = -\dot{r}(\gamma_Q - \varphi) \sin \gamma_Q \quad (2.3.21)$$

Elevando al cuadrado ambos miembros de la expresión (2.3.18) y operando se llega a:

$$\sin \gamma = \frac{r(\gamma - \varphi)}{\sqrt{(\dot{r}(\gamma - \varphi))^2 + (r(\gamma - \varphi))^2}} \quad (2.3.22)$$

De lo expresado en (2.3.21) y en (2.3.22) se tiene:

$$s(\varphi) = \frac{r(\gamma - \varphi) \dot{r}(\gamma - \varphi)}{\sqrt{(\dot{r}(\gamma - \varphi))^2 + (r(\gamma - \varphi))^2}} \quad (2.3.23)$$

expresión que se corresponde a la enunciada en (2.3.5).

Una vez establecidas todas las consideraciones geométricas, se debe tener en cuenta que la rueda gira sin deslizar y el punto de contacto es el eje instantáneo de rotación, y que además,

la velocidad de desplazamiento del tren v es lineal y constante sobre el carril de medición. Asimismo, el movimiento del eje de la rueda es una rotación pura en torno al eje instantáneo de rotación. Por tanto el vector velocidad del eje de la rueda está definido por:

$$\vec{V} = -\vec{\omega} \times \vec{r}(\gamma_Q, \varphi) \quad (2.3.24)$$

donde

$$\vec{\omega} = \omega \vec{k} \quad (2.3.25)$$

$$\vec{r}(\gamma_Q, \varphi) = g(\gamma_Q) \sin \gamma_Q \vec{j} + g(\gamma_Q) \cos \gamma_Q \vec{i} \quad (2.3.26)$$

Desarrollando el producto vectorial indicado en (2.3.24), se tiene:

$$\begin{aligned} \vec{V} &= \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ 0 & 0 & \omega \\ g(\gamma_Q) \cos \gamma_Q & g(\gamma_Q) \sin \gamma_Q & 0 \end{vmatrix} = \omega g(\gamma_Q) \sin \gamma_Q \vec{i} - \omega g(\gamma_Q) \cos \gamma_Q \vec{j} \\ &= \omega r(\gamma_Q - \varphi) \sin \gamma_Q \vec{i} - \omega r(\gamma_Q - \varphi) \cos \gamma_Q \vec{j} \\ &= \omega \sin \gamma_Q \left(r(\gamma_Q - \varphi) \vec{i} + \dot{r}(\gamma_Q - \varphi) \vec{j} \right) \quad (2.3.27) \end{aligned}$$

de (2.3.27) se observa que la componente en la dirección \vec{i} corresponde a la velocidad del tren:

$$v = \omega \sin \gamma_Q r(\gamma_Q - \varphi) \quad (2.3.28)$$

La componente en \vec{j} de (2.3.27) corresponde a la componente vertical de la velocidad del eje, dada por:

$$v_y = \omega \sin \gamma_Q \dot{r}(\gamma_Q - \varphi) = v \frac{\dot{r}(\gamma_Q - \varphi)}{r(\gamma_Q - \varphi)} = -\frac{v}{\tan \gamma_Q} \quad (2.3.29)$$

y tal como era de esperar, si la rueda es perfectamente redonda el punto de contacto se ubica en $\gamma_Q = \frac{3\pi}{2}$ y por tanto $v_y = 0$.

Observando la expresión de velocidad vertical para el eje de la rueda y lo indicado por (2.3.21), se puede escribir:

$$v_y = \omega \dot{\gamma}(\gamma_Q - \varphi) \sin \gamma_Q = \omega s(\varphi) \quad (2.3.30)$$

La componente de velocidad vertical sólo aparece bajo condiciones de irregularidades en el punto de contacto. Durante estas situaciones y bajo las condiciones de estabilidad del perfil, el centro de la rueda desciende de forma continua y monótona en dirección vertical hasta alcanzar una distancia máxima equivalente a la pérdida de radio d (la rueda se apoya sobre el plano) y luego asciende suavemente a su posición de origen⁴. Por tanto, durante el tiempo en el que la rueda atraviesa la irregularidad, el centro de la rueda cubre una distancia en vertical igual a $2d$, es decir:

$$\int_{t_1}^{t_2} |v_y| dt = 2d \quad (2.3.31)$$

Por otra parte, si se tiene en cuenta la igualdad expresada en (2.3.30) y se reemplaza en (2.3.31) se llega al enunciado del teorema 2.3.1:

$$A = \int_{t_1}^{t_2} \omega s(\varphi) dt = \int_{-\varphi_H}^{\varphi_H} s(\varphi) d\varphi \quad (2.3.32)$$

donde $\varphi_H = \theta_H$ se corresponde con el intervalo angular que determina la irregularidad. Observar que se obtiene un resultado idéntico al alcanzado por la aproximación realizada en (2.3.10), $A = 2d$. ♣

En otras palabras, basta integrar los valores medidos $|s(\varphi)|$ a lo largo de la irregularidad para obtener la pérdida de material d .

Una ventaja de la formulación (2.3.32) es que permite la presencia de puntos singulares en el perfil de la irregularidad puesto que $s(\varphi)$ es continua en los puntos singulares. En efecto, en un punto singular la rueda pivota, de forma que se mantiene fijo el punto de contacto Q mientras gira el centro de la rueda y se desplaza su proyección P . Como este movimiento es continuo con φ , no hay pérdida de continuidad en la función $s(\varphi)$. Una excepción se produce para $\varphi = 0$ cuando hay una parte plana, donde cambia instantáneamente de signo el valor de s (pasa de un retraso a un adelanto de Q sobre P). Posteriormente se tratarán de nuevo y con más detalles estos aspectos.

Por otra parte, de este teorema se derivan dos corolarios interesantes.

Corolario 2.3.2. *El área encerrada bajo la curva $|s(\varphi)|$ es igual para un plano original de longitud L que para cualquiera de los planos que sean consecuencia de su desgaste.*

⁴Este tema es ampliado posteriormente en la Sección §2.4.1 donde se realiza un estudio de la cinemática rueda-carril.

La demostración es inmediata, teniendo en cuenta que, en todos los casos, por la segunda condición de estabilidad del perfil, la pérdida de radio d se mantiene, por lo que el área $A = 2d$ es constante desde el plano nuevo a cualquier otro que le suceda con un nivel de desgaste arbitrario.

Corolario 2.3.3. *La detección y cuantificación de irregularidades aisladas puede realizarse extendiendo la integral a un intervalo angular arbitrariamente grande.*

En efecto, al ser $s = 0$ en toda la región circular, los límites de la integral en (2.3.32) pueden extenderse entre 0 y $\varphi_A \geq \varphi_H$. Como, por otra parte, el perfil es continuo en toda la irregularidad y tiene valores iguales en sus extremos, el desplazamiento s presenta un semiciclo negativo seguido de otro positivo; por tanto se puede escribir:

$$d = \frac{1}{2} \int_{-\varphi_A}^{\varphi_A} |s(\varphi)| d\varphi \quad (2.3.33)$$

donde $|\cdot|$ indica el valor absoluto y φ_A es suficientemente grande como para abarcar a cualquier irregularidad de interés. En el caso en que exista una región plana, la discontinuidad en $\varphi = 0$ tiene un área nula, por lo que (2.3.33) mantiene su validez.

El corolario 2.3.3 permite medir la pérdida de radio, o flecha, d sin conocimiento de la geometría de la irregularidad, ni siquiera su extensión.

Aplicación del teorema de la pérdida de radio

El problema de esta formulación es que no se cancela el ruido presente en s al operar con su valor absoluto. Este ruido se presenta en condiciones reales de aplicación como variaciones alrededor de $s = 0$ aunque la rueda sea perfectamente circular, causadas por pequeñas irregularidades en la rueda, limitaciones de los equipos electrónicos, interferencias con ruido estructural del carril y ruido eléctrico. En principio puede suponerse que el ruido en las medidas de s tiene una media nula.

Si (2.3.33) se formula alternativamente como:

$$d(\alpha) = \int_{\alpha}^{\alpha+\varphi_A} s(\varphi) d\varphi \quad 0 \leq \alpha \leq 2\pi \quad (2.3.34)$$

donde se opera con los valores de s con su signo y α es un parámetro auxiliar que puede variar desde 0 hasta 2π para cubrir una revolución completa de la rueda. Asimismo, se supone que φ_A se elige suficientemente grande como para abarcar la mayor irregularidad de interés.

Cuando el intervalo $[\alpha, \alpha + \varphi_A]$ corresponda a una región en la que la rueda se desplaza sobre la parte circular sin incluir ninguna irregularidad, $d(\alpha)$ será próximo a cero por el efecto de promediado del ruido de media cero.

Cuando el intervalo $[\alpha, \alpha + \varphi_A]$ incluya al semiciclo negativo de s hasta el punto en el que comienza el semiciclo positivo, $d(\alpha)$ tomará un valor máximo negativo d_N . Cuando dicho intervalo incluya al semiciclo positivo de s sin incorporar ningún punto del semiciclo negativo, $d(\alpha)$ tomará un valor máximo positivo d_P . Por la simetría supuesta debe ser $d_P \approx -d_N \approx d$ que, además de proporcionar una estimación de la pérdida de radio d con eliminación de ruido, proporciona un método para filtrar indicaciones que no correspondan a una irregularidad. En efecto, evaluando para todo el rango de α :

$$d_N = -\text{mín}[d(\alpha)] \quad (2.3.35)$$

$$d_P = \text{máx}[d(\alpha)] \quad (2.3.36)$$

el máximo negativo de d_N debe preceder al máximo positivo de d_P en una cantidad α . El valor d_e estimado para d resulta del promedio de ambas cantidades:

$$d_e = \frac{d_N + d_P}{2} \quad (2.3.37)$$

Desde de un punto de vista diferente, (2.3.34) representa la convolución de $s(\varphi)$ con una función rectangular de amplitud unidad y anchura φ_A , concepto que se utilizará en el proceso de medida en condiciones reales.

Velocidad del contacto rueda-carril

En el sistema de coordenadas de la Figura 2.5, la proyección del centro de la rueda se sitúa a una distancia x del origen, ubicado en una referencia fija sobre el carril en T (transductor). El ángulo φ es el de giro de la rueda, equivalente al ángulo que forma el centro de simetría con el eje de ordenadas. Cuando la rueda se mueve sobre el carril, la posición instantánea del centro de la rueda es x y la del punto de contacto rueda-carril $x + s$. Derivando respecto al tiempo se obtiene la velocidad del punto de contacto como:

$$v_Q = \frac{dx}{dt} + \frac{ds}{dt} = v + \frac{ds}{dt} = v + \frac{ds}{d\varphi} \frac{d\varphi}{dt} = v + \omega \frac{ds}{d\varphi} \approx v \left(1 + \frac{1}{R} \frac{ds}{d\varphi} \right) \quad (2.3.38)$$

donde v es la velocidad de desplazamiento del tren y ω es la velocidad angular de la rueda, aproximadamente constante ($\omega \approx v/R$). De este modo, las variaciones de s en el tiempo (o con

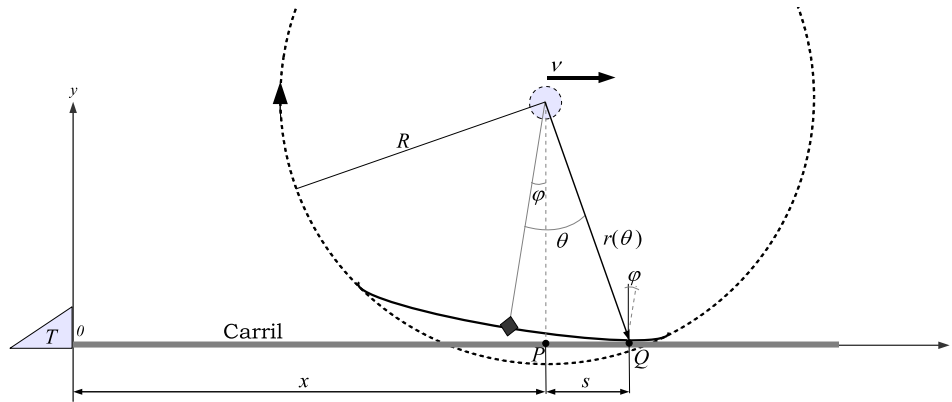


Figura 2.5: Distancia s entre la proyección P del centro de la rueda y el punto de contacto Q en el carril.

el ángulo $d\varphi = \omega dt$), representan variaciones de velocidad del punto de contacto a consecuencia de la irregularidad.

Durante el movimiento sobre la parte circular, $s = 0$ y $v_Q = v$. Al llegar el punto de rodadura a una irregularidad con radio $r(\theta) < R$ y $\theta_0 < \theta < 0$, el valor de s es negativo, pues el centro de la rueda adelanta al punto de contacto y $v_Q < v$. Cuando $\theta = 0$ (punto de menor radio) el valor de $s = 0$ ya que la proyección del centro de la rueda coincide con el punto de contacto. Cuando $\theta > 0$ se produce el fenómeno inverso, adelantando el punto de rodadura a la proyección del centro de la rueda, con lo que $s > 0$ y $v_Q > v$.

La velocidad media en el recorrido de la irregularidad es $\tilde{v}_Q = v$, pues el atraso del punto de contacto debe quedar perfectamente compensado por el subsiguiente adelanto, de forma que exista continuidad de velocidad antes y después de la irregularidad.

En los puntos de transición de la rueda circular a la irregularidad, en virtud de la continuidad de pendientes, el valor de $s = 0$, como en la parte circular. Esto indica que la gráfica de $s(\varphi)$ muestra un primer semiciclo negativo seguido de un semiciclo positivo, cualesquiera que sea la geometría de la irregularidad.

De este modo la presencia de irregularidades se puede determinar midiendo las variaciones en la velocidad de desplazamiento del punto de contacto o, lo que es lo mismo, la variación de s con el ángulo φ . Para ello, se dispone un carril de medida por el que se envían ondas ultrasónicas superficiales. El punto de contacto produce un eco que se registra por un transductor receptor en T . La medida se puede realizar:

- a) Mediante técnicas Doppler, sensibles a la velocidad de un móvil. En este caso se trata de determinar las variaciones de velocidad del punto de contacto al pasar por una irregularidad. Así, cuando la velocidad de desplazamiento del punto de contacto es constante

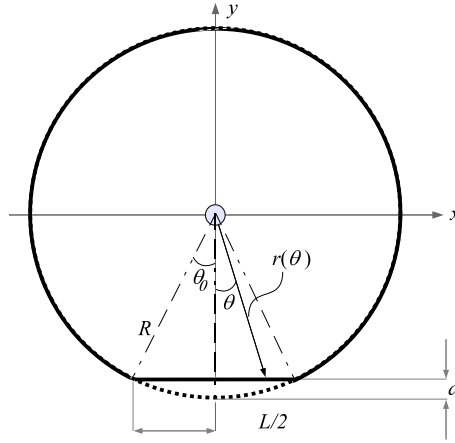


Figura 2.6: Geometría de un plano nuevo.

($s = 0$), se determina la frecuencia Doppler que corresponde a la del tren (2.3.38). Cuando varía ($s \neq 0$), la frecuencia Doppler muestra desviaciones respecto a la nominal, poniendo de manifiesto la irregularidad.

- b)_ Mediante técnicas pulso-eco, en las que la velocidad del móvil se determina midiendo los tiempos de vuelo del transductor al punto de contacto (eco) a intervalos regulares⁵. Las desviaciones en la regularidad de los desplazamientos del eco representan el valor s . Cuando $s = 0$ la rueda es circular, cuando $s \neq 0$ (variaciones) es señal de que la rueda se desplaza por una irregularidad. En este caso se mide directamente $s(t) = s(\varphi/\omega)$, lo que permite determinar la pérdida de radio para luego dimensionar el tamaño del plano inicial mediante relaciones geométricas.

Ambas técnicas de medida serán descritas posteriormente en la Sección §2.5.

2.4. Geometría de un plano en diferentes etapas

En la *Etapa I* existe una relación muy simple entre la longitud L del plano recién formado y la pérdida d de material por abrasión. Con referencia a la Figura 2.6,

$$L = 2R \sin \theta_0 \quad (2.4.1)$$

$$d = R - R \cos \theta_0 \quad (2.4.2)$$

⁵En esta técnica también existe un desplazamiento por efecto Doppler entre los pulsos emitidos y recibidos, sin embargo se desprecia. En secciones posteriores se comentará acerca de este tema.

Combinando ambas expresiones,

$$L = 2 \sqrt{2Rd - d^2} \approx \sqrt{8Rd} \quad (2.4.3)$$

ecuación que relaciona la longitud L de un plano nuevo con la pérdida de radio, o flecha, d . Por otro lado, conociendo la longitud del plano, dada por (2.4.1), se puede determinar la profundidad del defecto.

La función que describe el radio⁶ de la rueda en coordenadas polares es:

$$\begin{aligned} r = r_P &= \frac{R-d}{\cos \theta} & |\theta| < \theta_0 \\ r = r_C &= R & |\theta| > \theta_0 \end{aligned} \quad (2.4.4)$$

donde, r_P es el radio de la zona plana, r_C el de la zona circular y, de (2.4.2):

$$\cos \theta_0 = 1 - \frac{d}{R} \quad (2.4.5)$$

En la *Etapla II* la descripción se realiza mediante una combinación de funciones curvas y rectas. Para describir el radio de curvatura de un plano desgastado se ha venido utilizando la función *haversine* [Baeza et al., 2006a,b; Lyon, 1972; Newton y Clark, 1979; Remennikov y Kaewunruen, 2008; Seco et al., 2006; Uzzal et al., 2008, 2009]. Debe hacerse la observación de que ha servido para modelar el movimiento vertical de la rueda y evaluar, por simulación, las fuerzas de impacto sobre el carril en diferentes condiciones. En ningún caso se ha estudiado el movimiento de rodadura sobre el carril (esto es, desplazamientos horizontales del punto de contacto). La función *haversine*, definida en (2.4.6) se limita a los intervalos curvos en la *Etapla II*.

En la *Etapla III*, en la que el plano ha degenerado completamente, puede considerarse la función *haversine* en toda su extensión:

$$\begin{aligned} r = r_H &= R - \frac{d}{2} \left(1 + \cos \frac{\pi \theta}{\theta_H} \right) & -\theta_H \leq \theta \leq \theta_H \\ r = r_C &= R & |\theta| > \theta_H \end{aligned} \quad (2.4.6)$$

donde r_H es el radio en la zona de la irregularidad.

⁶El radio r_P es la distancia del centro de la rueda a cada punto en la irregularidad.

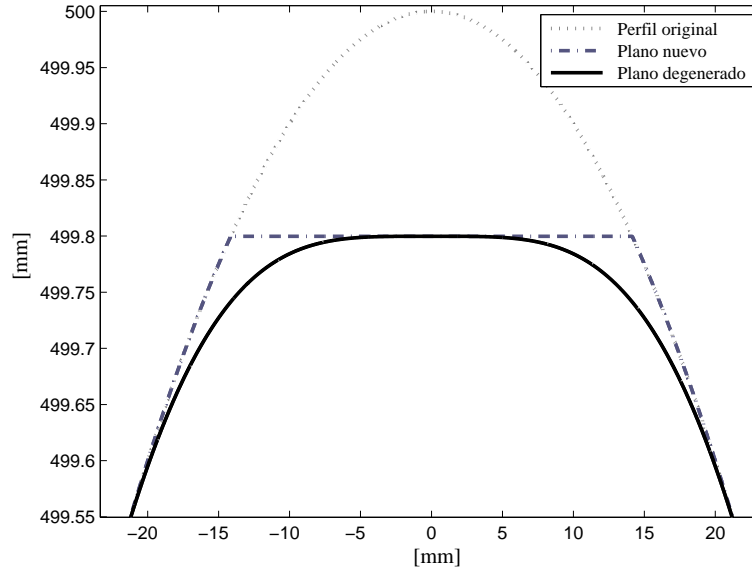


Figura 2.7: Comparación del perfil de la geometría circular, plano nuevo y degenerado con desgaste crítico. $R=500\text{mm}$, $d=0.2\text{mm}$ que resulta en $L=28.3\text{mm}$ (longitud del plano nuevo).

La función r_H varía con θ como un coseno entre $-\pi$ y π y, por lo tanto, es una curva continua y convexa vista desde el rail (verificación de la condición **C.1** de estabilidad del perfil, Sección §2.2.1). Además, para $\theta = 0$, $r_H = R - d$, esto es, mantiene la pérdida de material original (condición **C.2** para la estabilidad del perfil). Se comprueba que, para $\theta = \pm\theta_H$, $r_H = R$ (la curva definida para todo θ es continua) y, además, $\dot{r}_H = \dot{r}_C = 0$ (derivadas continuas). Conjuntamente satisfacen la condición **C.3** para la estabilidad del perfil.

Por otra parte el ángulo θ_H , definido como el arco de circunferencia que da soporte a la irregularidad, debe tener una dimensión mayor que la del original θ_0 (Etapa I), pues en otro caso sería $r_H \geq R$ para ciertos ángulos. Por tanto, para verificar la condición de estabilidad del perfil **C.4**, debe ser $\theta_H = \xi \theta_0$, donde $\xi > 1$. La Figura 2.7 compara el perfil de una rueda circular con un plano nuevo y uno degenerado con desgaste crítico (coordenadas cartesianas con los parámetros $d=0.2\text{mm}$, $R=500\text{mm}$).

Denominamos *desgaste crítico* al mínimo valor de ξ que da soporte a la función de la irregularidad sin regiones planas. Dicho en otros términos, esto significa que el radio r_P del plano nuevo dado por (2.4.4) debe ser mayor o igual al radio r_H dado por (2.4.6), esto es, la función no debe cruzar a la que define el plano original dentro de su dominio:

$$r_P = \frac{R-d}{\cos\theta} \geq R - \frac{d}{2} \left(1 + \cos \frac{\pi\theta}{\theta_H} \right), \quad |\theta| \leq \theta_0 \quad (2.4.7)$$

Operando se obtiene:

$$\cos \frac{\pi \theta}{\theta_H} \geq \frac{2(R - r_P)}{d} - 1, \quad |\theta| \leq \theta_0 \quad (2.4.8)$$

Esta ecuación sólo puede resolverse para θ_H en el rango $|\theta| \leq \theta_0$ por métodos numéricos, pues ambos términos disminuyen al aumentar $|\theta|$ con pendientes similares.

Para abordar la solución al problema, se ha utilizado un algoritmo de aproximaciones sucesivas, obteniendo el resultado con un error ε arbitrariamente bajo. Con el fin de generalizar al máximo posible los resultados, se normalizan los valores de r_P y r_H al valor del radio nominal R de la rueda. Con:

$$\eta = \frac{d}{R} \quad (2.4.9)$$

que expresa la fracción de pérdida de radio al formarse el plano nuevo,

$$r_{P\eta} = \frac{1 - \eta}{\cos \theta} \quad (2.4.10)$$

$$r_{H\eta} = 1 - \frac{\eta}{2} \left(1 + \cos \frac{\pi \theta}{\theta_H} \right) \quad (2.4.11)$$

ecuaciones con sólo dos parámetros, η y θ para encontrar θ_H . Por otra parte, de (2.4.5),

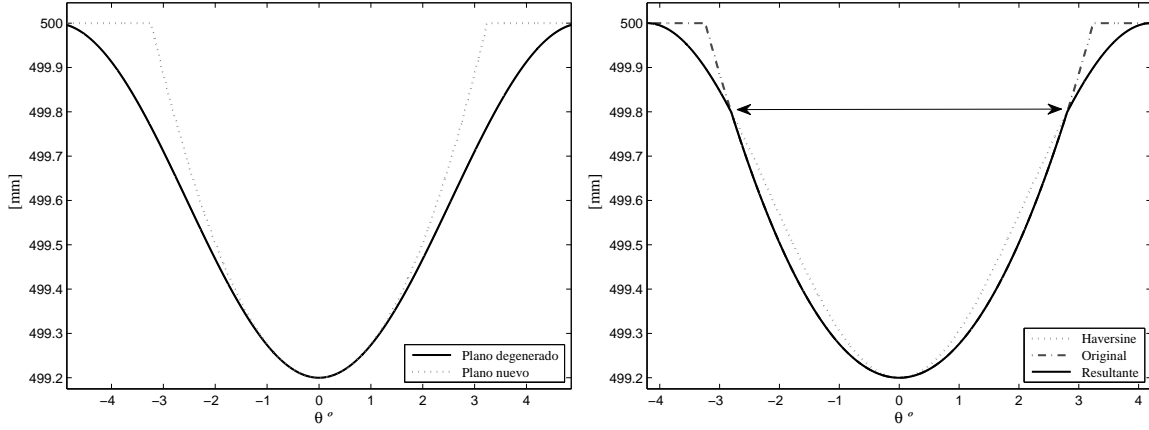
$$\cos \theta_0 = 1 - \eta \quad (2.4.12)$$

$$L_\eta = 2 \sqrt{2\eta - \eta^2} \approx 2 \sqrt{2\eta} \quad (2.4.13)$$

ecuación que proporciona la longitud del plano original normalizado al radio R .

El algoritmo de aproximaciones sucesivas es el siguiente:

- ① Dato de entrada: η . Se obtiene θ_0 de (2.4.12).
- ② Obtener N ($= 10^3$) ángulos de θ a intervalos $\Delta\theta = \theta_0/(N - 1)$ cubriendo el rango $[0, \theta_0)$.
- ③ Elegir el valor inicial para θ_H ($= 2\theta_0$) y para $\Delta\theta_H$ ($\theta_0/2$).
- ④ Evaluar para los N ángulos θ y el valor θ_H las funciones r_P y r_H .



(a) Perfil del plano degenerado obtenido con la función *haversine* y el ángulo crítico $\theta_H = \pi\theta_0/2$. (b) Plano en *Etapa II*; el perfil sigue al del plano original, pero sus bordes están desgastados ($\theta_H = 1.3\theta_0$).

Figura 2.8: Comparación entre el radio de un plano original con planos degenerados.

- ⑤ Si $r_P \geq r_H$ para todos los ángulos θ : hacer $\Delta\theta_H = -|\Delta\theta_H|/2$; en otro caso: hacer $\Delta\theta_H = |\Delta\theta_H|/2$.
- ⑥ Hacer $\theta_H = \theta_H + \Delta\theta_H$ y repetir desde ④ hasta que $|\Delta\theta_H| < \varepsilon$.

Este algoritmo se ha repetido para múltiples valores de η , cubriendo el intervalo $[5 \cdot 10^{-5}, 5 \cdot 10^{-3}]$, que equivale a planos nuevos en un rango de 3 a 100mm a incrementos de 0.1mm, aproximadamente, en ruedas de 500mm de radio. El número de iteraciones necesarias para $\varepsilon = \theta_0 \cdot 10^{-6}$ es inferior a 20 en todos los casos.

Un resultado interesante es que el valor de θ_H es prácticamente proporcional a θ_0 , con una constante $\xi = \pi/2$, en todo el rango analizado. Así, pues, empíricamente, el *valor crítico* del parámetro θ_H es:

$$\theta_{Hc} \approx \frac{\pi\theta_0}{2} \quad (2.4.14)$$

La Figura 2.8a compara los radios r_P y r_H crítico para un plano original de $L = 56.5\text{mm}$ en una rueda de $R = 500\text{mm}$ de radio ($d = 0.8\text{mm}$, $\theta_0 = 3.2^\circ$, $\eta = 0.16\%$, $\theta_H = 5.1^\circ$). Se observa una transición suave para el caso de la función *haversine* en las proximidades de $\theta = \theta_H$, mientras que la pendiente del radio del plano original cambia bruscamente en θ_0 . El plano degenerado tiene una longitud total $L_H \approx R\theta_H = 88.8\text{mm}$.

Cuando el valor del parámetro $\theta_H < \theta_{Hc}$, el radio $r_H > r_P$. Esto no tiene sentido en este contexto, ya que supondría una aportación de material a la superficie de rodadura. Aunque en la práctica

podiera haber una cierta aportación de material transitoria a partir del desgaste de los bordes del plano, ésta desaparecerá rápidamente con la circulación de la rueda, pues quedaría sometida incluso a mayores presiones y fuerzas de impacto que los puntos singulares originales. Por consiguiente, en este análisis y en la literatura consultada [Baeza et al., 2006a; Seco et al., 2006; Steenbergen, 2008], se considera que pueden convivir una zona desgastada que sigue la función haversine con otra región plana en aquellos intervalos en los que $r_H > r_P$.

La Figura 2.8b muestra esta situación para el caso anterior con $\theta_H = 1.3\theta_0 < \theta_{Hc}$. Se observa que hay un cambio de pendiente en los bordes de la región en la que $r_H > r_P$. El intervalo está marcado con una línea de trazos y doble flecha y, en esta región, el perfil de la banda de rodadura sigue al del plano original, mientras que los bordes de éste se han desgastado (*Etapas II*).

2.4.1. Cinemática del contacto rueda-carril

La detección y medida de planos se debe realizar con el tren en movimiento. La geometría de la irregularidad influye en la cinemática del contacto entre rueda y carril, pero no afecta a la metodología general de análisis que se discutirá en la Sección §2.5. Aquí se particulariza el estudio al caso de plano nuevo, parcialmente desgastado y degenerado utilizando como modelo geométrico la función haversine en sus tres etapas.

Aunque la geometría de la irregularidad se correspondiera con una función distinta, es de esperar que los resultados no difieran en exceso de los aquí obtenidos, ya que se trata de pequeñas longitudes de arco, donde las condiciones de estabilidad del perfil limitan las posibilidades de variación geométrica. En cualquier caso, la metodología general no requiere el conocimiento de la geometría exacta de la irregularidad. Los resultados aquí obtenidos son relevantes para la evaluación práctica de planos y otras irregularidades.

Plano en la Etapa I

Cuando la rueda se desplaza sobre su parte circular, el punto de contacto con el carril Q coincide con la proyección P del centro de la rueda. Esta situación se mantiene hasta que Q alcanza el borde del plano (primer punto singular, Figura 2.9a). A partir de este momento la rueda pivota sobre el punto de contacto Q , que permanece estático, mientras que el centro de la rueda describe una trayectoria circular descendente con centro en Q y radio R (Figura 2.9b).

Con el centro de la rueda y su proyección P sobre el carril definiendo el eje de ordenadas, para un ángulo de giro de la rueda φ , la distancia s es:

$$s(\varphi) = -R \sin \varphi \quad 0 \leq \varphi \leq \theta_0 \quad (2.4.15)$$

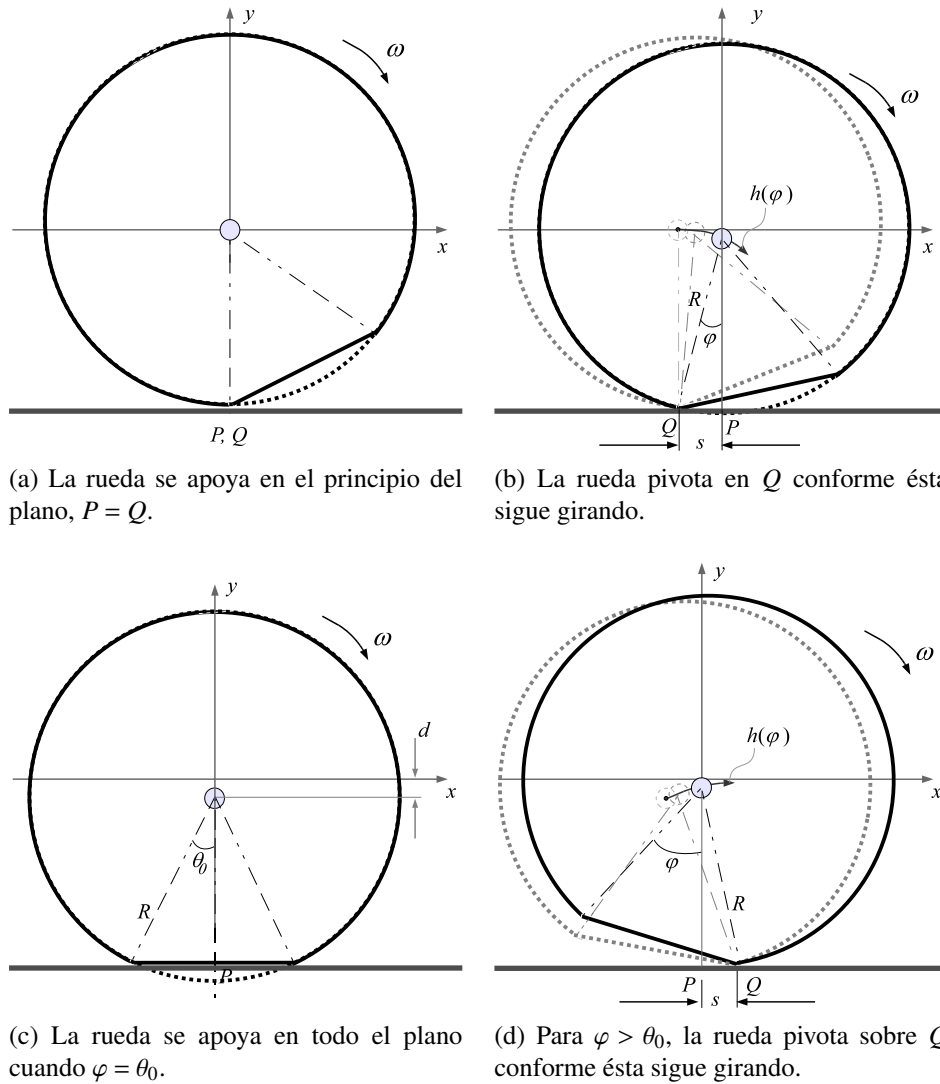


Figura 2.9: (a) y (b) Movimiento de la rueda al llegar a una irregularidad plana. El punto de contacto rueda-carril Q se retrasa respecto a la proyección del centro de la rueda P ($s < 0$). (c) La rueda se apoya sobre el plano. (d) La rueda continua su movimiento apoyándose en el segundo borde de la irregularidad. La proyección P del centro de la rueda sobre el carril queda retrasada respecto al punto de contacto rueda-carril Q ($s > 0$).

Por otra parte, el centro de la rueda se desplaza en vertical una distancia h igual a:

$$h(\varphi) = R \cos \varphi - R \quad 0 \leq \varphi \leq \theta_0 \quad (2.4.16)$$

que proporciona $h < 0$ (reducción de la distancia centro de rueda al carril).

Cuando el giro de la rueda alcanza el valor $\varphi = \theta_0$, se produce un completo apoyo de la parte plana rueda sobre el carril y la posición de Q es indeterminada entre $-L/2$ y $+L/2$ (Figura 2.9c). Arbitrariamente se hace coincidir P con Q , de modo que $s = 0$, comportamiento similar al que se produce con un plano degenerado.

Para valores $\varphi > \theta_0$, la rueda pivota sobre el segundo borde del plano (Figura 2.9d), donde se sitúa el punto de contacto Q , hasta que $\varphi = 2\theta_0$, con lo que:

$$s(\varphi) = R \sin(2\theta_0 - \varphi) \quad \theta_0 < \varphi \leq 2\theta_0 \quad (2.4.17)$$

Análogamente, el centro de la rueda comienza a ascender según:

$$h(\varphi) = R \cos(2\theta_0 - \varphi) - R \quad \theta_0 < \varphi \leq 2\theta_0 \quad (2.4.18)$$

De (2.4.15), $s(\theta_0^-) = -R \sin \theta_0$; de (2.4.17), $s(\theta_0^+) = R \sin \theta_0$. Por consiguiente el salto en la discontinuidad en θ_0 es:

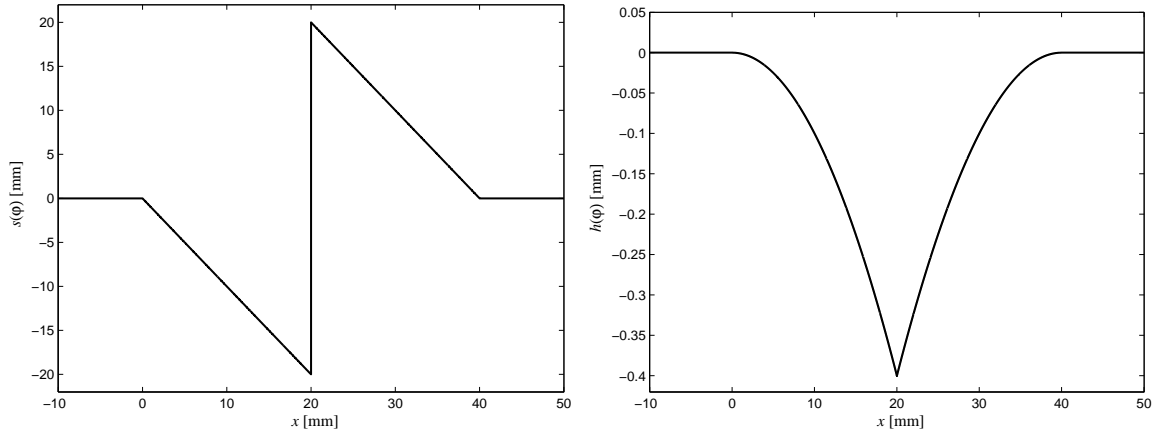
$$\Delta s(\theta_0) = s(\theta_0^+) - s(\theta_0^-) = 2R \sin \theta_0 = L \quad (2.4.19)$$

Por consiguiente, una forma de medir el valor de L para *planos nuevos* es determinar la distancia pico a pico del desplazamiento s .

La Figura 2.10 muestra los desplazamientos s y h para un plano de $L = 40\text{mm}$ en una rueda de radio $R = 500\text{mm}$ en función de la distancia recorrida por la rueda x , desde 10mm antes del plano hasta 10mm después. Se observa que:

- a)_ La longitud x sobre la cual $s \neq 0$ es igual a L , como cabía esperar.
- b)_ La discontinuidad en $x = L/2 = 20\text{mm}$ es igual a $L = 40\text{mm}$; ecuación (2.4.19).

Por otra parte, el área encerrada bajo la curva $s(\varphi)$ es:



(a) Desplazamiento s entre el punto de contacto y la proyección del centro de la rueda. (b) Desplazamiento vertical h del centro de la rueda.

Figura 2.10: Curvas $s(\varphi)$ y $h(\varphi)$ correspondientes a un plano nuevo de $L = 40\text{mm}$ en una rueda de $R = 500\text{mm}$. Ambas curvas representadas en función de la distancia recorrida por la rueda x .

$$A = \int_0^{\theta_0} R \sin \varphi \, d\varphi + \int_{\theta_0}^{2\theta_0} R \sin(2\theta_0 - \varphi) \, d\varphi \quad (2.4.20)$$

$$A = 2R (1 - \cos \theta_0) = 2d \quad (2.4.21)$$

donde se ha utilizado (2.4.2). Este resultado confirma la propiedad enunciada en la Sección §2.3.1 ecuación (2.3.32) para planos nuevos.

Por su parte, el descenso de la rueda mostrado en la Figura 2.10b es responsable del impacto producido sobre el carril. Su estudio requiere el modelado de las masas, constantes elásticas y amortiguamientos involucrados (rueda, bogie, carril, traviesas, etc.) en condiciones dinámicas, como ha sido abordado por diversos autores [Baeza et al., 2006b; Remennikov y Kaewunruen, 2008; Seco et al., 2006; Steenberg, 2008; Wu y Thompson, 2001, 2002, 2004].

Finalmente, por aplicación de (2.4.3):

$$d \approx \frac{L^2}{8R} \quad (2.4.22)$$

que, para los valores de este ejemplo ($L = 40, R = 500$) resulta $d \approx 0.4\text{mm}$, valor que se corresponde con el máximo de $|h|$ en la Figura 2.10b.

Plano en la Etapa III

En este caso el plano ha degenerado hasta obtener una curva continua siguiendo una función haversine, dada por (2.4.6). En ésta, el parámetro θ_H determina el nivel de desgaste a partir de un mínimo $\theta_{Hc} = \pi \theta_0/2$.

$$\begin{aligned} r = r_H &= R - \frac{d}{2} \left(1 + \cos \frac{\pi \theta}{\theta_H} \right) & -\theta_H \leq \theta \leq \theta_H \\ r = r_C &= R & |\theta| > \theta_H \end{aligned}$$

Teniendo en cuenta la aproximación (2.3.6) y la relación (2.3.7), aquí repetidas:

$$\begin{aligned} s(\theta) &\approx \dot{r}(\theta) \\ s(\theta) &= r(\theta) \sin(\theta - \varphi) \approx r(\theta) (\theta - \varphi) \end{aligned}$$

Derivando la función *haversine*:

$$s(\theta) = \frac{\pi d}{2\theta_H} \sin\left(\frac{\pi \theta}{\theta_H}\right) \quad (2.4.23)$$

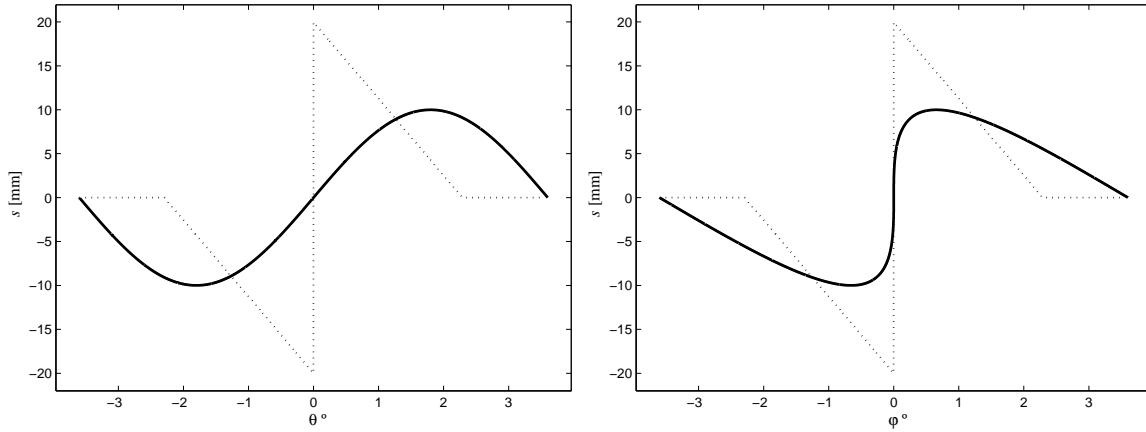
que proporciona el valor del desplazamiento s entre el punto de contacto y la proyección del centro de la rueda en función de la coordenada polar θ . Despejando de la relación (2.3.7), se obtiene $\varphi = f(\theta)$:

$$\varphi = \theta - \frac{s(\theta)}{r(\theta)} \quad (2.4.24)$$

donde $r(\theta)$ y $s(\theta)$ vienen dadas por las ecuaciones (2.4.6) y (2.4.23), respectivamente. Así, para cada valor de la coordenada polar θ se obtiene el ángulo φ girado por la rueda.

Operando de este modo, la Figura 2.11a muestra, la variación de s con θ y, en 2.11b la de s con φ para una irregularidad con desgaste crítico correspondiente a una pérdida de material $d = 0.4\text{mm}$ en una rueda de $R = 500\text{mm}$, al que le corresponde un plano original de 40mm, aproximadamente. En la misma Figura 2.11 se representa, con línea de puntos, el desplazamiento de s para el plano original.

Es interesante realizar las siguientes observaciones:



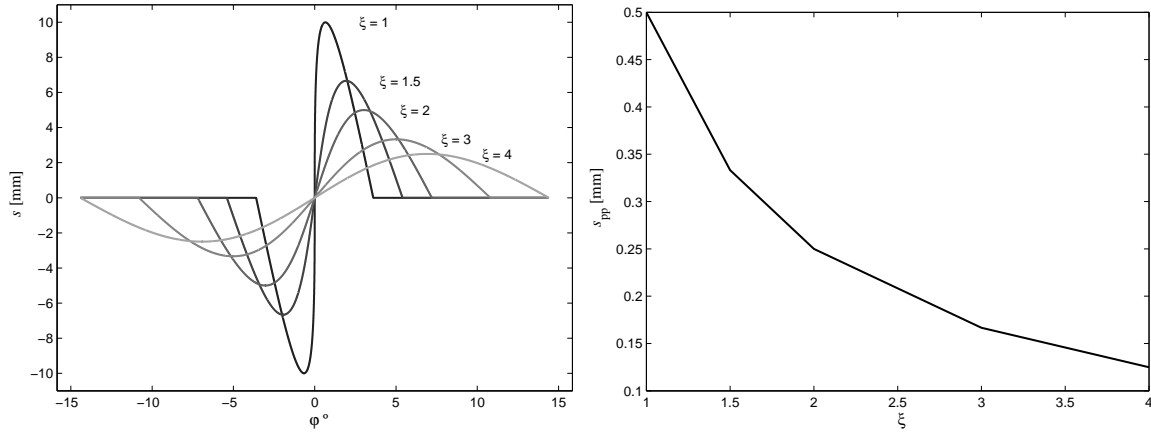
(a) Desplazamiento s en función de la coordenada polar θ . (b) Desplazamiento s en función del ángulo de giro φ .

Figura 2.11: Desplazamiento s en función de θ y de φ . En ambas gráficas se representa, con línea de puntos, el desplazamiento correspondiente al plano inicial. $R = 500\text{mm}$, $d = 0.4\text{mm}$, $L = 40\text{mm}$.

- a)_ La morfología de $s(\theta)$ y $s(\varphi)$ difieren significativamente. La razón es que a intervalos $\Delta\theta$ constantes no le corresponden intervalos de giro $\Delta\varphi$ constantes. Suponiendo una velocidad angular constante, el paso de la rueda por la parte central de la irregularidad es mucho más rápida que por los extremos, una situación similar a la que se produce con el plano original, aunque suavizado al no existir puntos singulares.
- b)_ No obstante, el dominio de θ y φ durante la irregularidad es el mismo (en este caso de -3.6° a $+3.6^\circ$).
- c)_ A diferencia de la amplitud pico a pico de s en el plano original, para un plano desgastado no existe una relación con su longitud (que es mayor), ni con la del plano original. La amplitud de la oscilación de s (en este caso 20mm pico a pico) es dependiente del nivel de desgaste que tiene la irregularidad .

Esta última observación se refleja gráficamente en la Figura 2.12a, donde se representa s en función de φ para diferentes valores de θ_H normalizados al valor crítico $\theta_{Hc} = \pi\theta_0/2$. En la Figura 2.12b se representa la amplitud pico a pico de la oscilación de s en función del grado de desgaste ξ , donde $\xi = \theta_H/\theta_{Hc}$.

Se comprueba que la amplitud de la oscilación se reduce con niveles de desgaste crecientes. Como éste se desconoce, no es posible estimar la pérdida de radio d (constante en todos estos casos) a partir de la amplitud de la oscilación. Podría llegar a determinarse la longitud del plano degenerado actual a partir de la extensión de s , pero esta medida resulta poco robusta para niveles de desgaste grandes y, además, tampoco proporciona información de la pérdida de material.



(a) Oscilación de $s(\varphi)$ para distintos valores de desgaste del plano. (b) Amplitud pico a pico de s en función del nivel de desgaste normalizado a la longitud del plano original.

Figura 2.12: Evolución del desgaste en un plano inicial de $L=40\text{mm}$, con $R=500\text{mm}$, $d=0.4\text{mm}$.

La amplitud decreciente de la oscilación de s puede llegar incluso a comprometer la detección de un plano en presencia de cierto nivel de ruido. Afortunadamente el teorema de la pérdida de radio proporciona un método robusto de estimación de d .

En efecto, sustituyendo (2.4.23) en (2.3.10):

$$\int_0^{\theta_H} s(\theta) d\theta = \frac{\pi d}{2 \theta_H} \int_0^{\theta_H} \sin\left(\frac{\pi \theta}{\theta_H}\right) d\theta \quad (2.4.25)$$

que resulta en:

$$\int_0^{\theta_H} s(\theta) d\theta = \frac{\pi d}{2 \theta_H} \frac{\theta_H}{\pi} \left[-\cos\left(\frac{\pi \theta}{\theta_H}\right) \right]_0^{\theta_H} = d \quad (2.4.26)$$

Por consiguiente, para determinar la pérdida de radio d , basta realizar la integración del valor de s sobre un intervalo angular suficientemente grande.

Plano en la Etapa II

La irregularidad es una composición de una parte curva, que se supone sigue la función *haver-sine* en la parte externa y una parte plana central con una pérdida de radio d .

La cinemática de esta irregularidad y, en particular, de la posición instantánea s del punto de

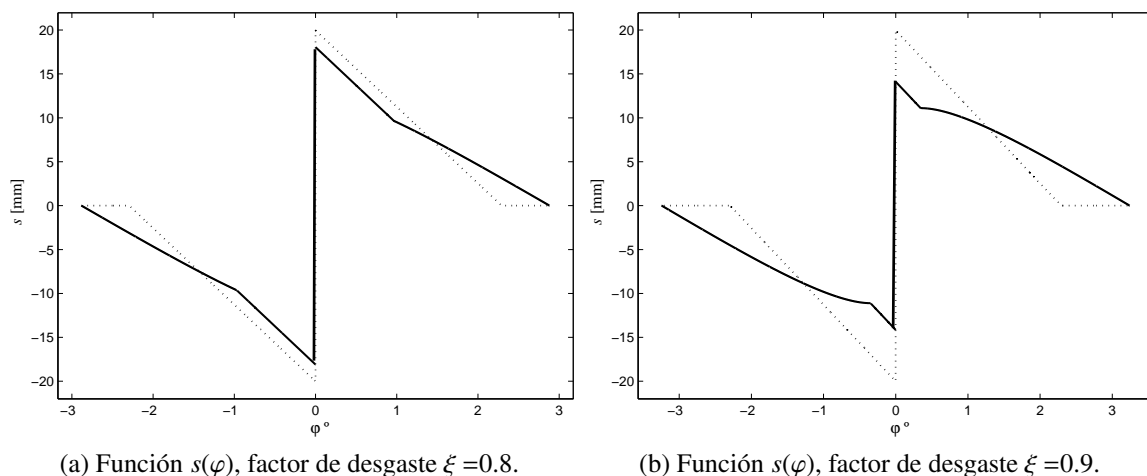


Figura 2.13: Representación de la función $s(\varphi)$ en planos de la *Etapa II* de formación. (a) y (b) variación de s respecto al ángulo de giro φ (*haversine*+*región plana*).

contacto respecto al centro de la rueda, es una composición del movimiento sobre ambas funciones, analizadas anteriormente.

La Figura 2.13 muestra la variación de s respecto al ángulo de giro φ para dos niveles de desgaste sub-crítico, $\xi = 0.8$ y $\xi = 0.9$. En el primer caso, se observa que la región plana tiene una mayor longitud al tener un menor nivel de desgaste, y la amplitud de la oscilación de s se asemeja más a la del plano original (mostrado con trazos). Para $\xi = 0.64$ ($\approx 2/\pi$) el plano desgastado y el original son prácticamente iguales.

Por el contrario, con un nivel de desgaste más próximo al crítico que se da para $\xi = 1$, la Figura 2.13b muestra claramente la transición entre la región curva, próxima a los bordes de la irregularidad y la zona plana, con cambio de pendiente (presencia de puntos singulares). La amplitud de la oscilación de s es menor conforme aumenta el nivel de desgaste, tal y como se mostró en la Figura 2.12.

2.5. Técnicas de medida

A continuación se describen las dos técnicas de medida propuestas en la Sección §2.3 para determinar las variaciones de s respecto el ángulo φ , ambas utilizan un carril de medida por el que se envían ondas ultrasónicas superficiales. Cuando la rueda pasa por la zona de medida, el punto de contacto rueda-carril produce un eco que se registra por un transductor receptor. Los cambios en su velocidad de desplazamiento permiten determinar la presencia de irregularidades y estimar su extensión.

2.5.1. Detección de planos mediante el efecto Doppler

Esta técnica fue desarrollada durante el trabajo tutelado (DEA) del autor [Brizuela, 2007]. Consiste en enviar una onda superficial continua de frecuencia f_E por el carril de medida, generada por un transductor emisor. Otro transductor receptor, ubicado en las proximidades del anterior, recibe la débil señal de eco producida por el contacto rueda-carril.

Una vez amplificada, se compara la frecuencia f_R de la señal recibida con la de la emitida. Para ello se utilizó un demodulador en cuadratura, que proporciona una señal Doppler de frecuencia $f_D = |f_E - f_R|$ y el sentido del movimiento (alejándose o acercándose al receptor), aunque en este caso la información no es necesaria.

Como es bien conocido, el desplazamiento de frecuencia Doppler es proporcional a la componente de velocidad v_Q del móvil (punto de contacto) en la dirección del receptor e inversamente proporcional a la velocidad c de propagación de la onda en el medio. En este caso ambas direcciones coinciden, con lo que:

$$f_D = \frac{2v_Q}{c} f_E \quad (2.5.1)$$

Sustituyendo el valor de v_Q expresado en (2.3.38),

$$f_D = \frac{2v}{c} f_E + \frac{2f_E}{c} \frac{ds}{dt} \quad (2.5.2)$$

El primer término es constante y representa el desplazamiento Doppler nominal a la velocidad de circulación del tren. Con una rueda circular, el segundo término es nulo ($s = 0$). Cuando aparece una irregularidad el valor de s varía en el tiempo, desplazando la frecuencia Doppler nominal a:

$$\frac{ds}{dt} = \frac{c}{2f_E} f_D - v \quad (2.5.3)$$

siendo c y f_E datos de diseño, mientras que f_D y v son medidas realizadas. El resultado se integra para obtener:

$$s(t) = \left(\frac{c}{2f_E} f_D - v \right) t \quad (2.5.4)$$

y de este resultado se puede obtener la dimensión del defecto.

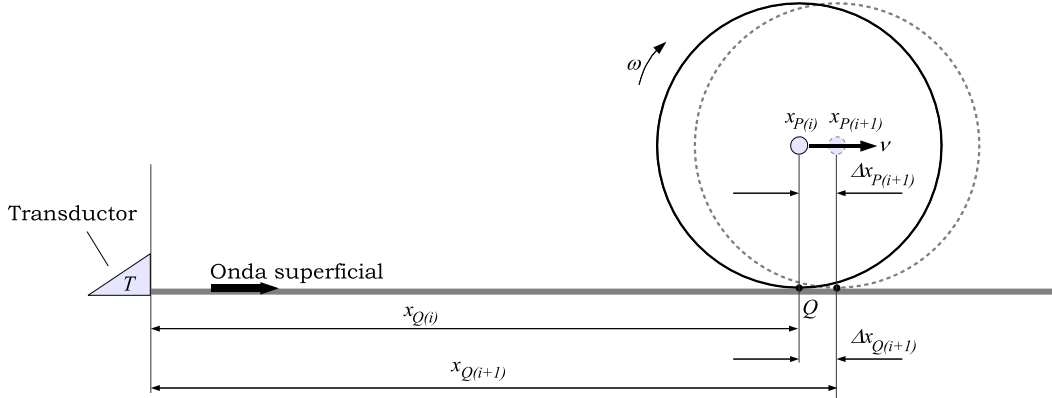


Figura 2.14: Movimiento de la rueda sobre el carril de medida.

Teóricamente esta técnica facilita la obtención de $s(t)$ con una resolución muy elevada, ya que no es un sistema muestreado y opera en onda continua. En la práctica, la integración de (2.5.3) para obtener (2.5.4) debe realizarse sobre intervalos temporales suficientemente pequeños para obtener una buena resolución en los desplazamientos s y, al mismo tiempo, lo suficientemente grandes como para resolver la frecuencia f_D con precisión y abarcar toda la longitud de los posibles defectos (φ_A grande, según el corolario 2.3.3). Esta es la típica situación de conflicto tiempo-frecuencia que debe abordarse mediante soluciones de compromiso.

Otro problema asociado a la técnica Doppler es la baja relación señal-ruido que se obtiene por la debilidad del eco producido por el contacto rueda-carril y la presencia de una muy fuerte componente de frecuencia nominal f_E . No obstante, el trabajo realizado permitió detectar planos mayores a 30mm, si bien su dimensionamiento no resultó posible con la suficiente precisión [Brizuela et al., 2009, 2010].

Por estas razones y, con la excepción de esta corta reseña al trabajo previo sobre utilización del efecto Doppler, la presente memoria de Tesis se centra en la detección de planos mediante la técnica de pulso-eco.

2.5.2. Técnica de pulso-eco para la detección de planos

La Figura 2.14 muestra el principio de funcionamiento. En un origen de coordenadas marcado T se sitúa un transductor emisor-receptor de ondas superficiales. El transductor opera en pulso-eco, enviando un impulso ultrasónico de frecuencia central f_E por la superficie del carril de medida y recibiendo los ecos producidos por el punto Q de contacto rueda-carril. Los pulsos se envían a una cadencia constante, con un periodo de repetición T_{PRF} .

La rueda se desplaza con una velocidad horizontal v que se supone constante o localmente

constante⁷. Con el punto de contacto rueda-carril Q a una distancia $x_{Q(i)}$ del origen en T en el momento en que llega el pulso ultrasónico i a Q , el tiempo de vuelo en ida y vuelta es $T_{Q(i)}$, y:

$$x_{Q(i)} = \frac{c T_{Q(i)}}{2} \quad (2.5.5)$$

Por su parte, el centro de la rueda (y su proyección P) se desplaza una distancia:

$$x_{P(i)} = i v T_{PRF} \quad (2.5.6)$$

El desplazamiento $s_{(i)}$ entre la proyección del centro de la rueda y el punto de contacto con el carril se obtiene de la diferencia $x_{Q(i)} - x_{P(i)}$:

$$s_{(i)} = \frac{c T_{Q(i)}}{2} - i v T_{PRF} \quad (2.5.7)$$

La presencia de una irregularidad se determina cuando $s \neq 0$, con un semiciclo negativo seguido de otro positivo, como se expuso anteriormente. En esta ecuación los valores de c (velocidad de propagación del ultrasonido) y T_{PRF} (periodo de repetición entre pulsos) son constantes de diseño conocidas; el valor de $T_{Q(i)}$ es el tiempo de vuelo del pulso i , que se mide, mientras que la velocidad de circulación del tren v puede ser conocida.

Además, hay un método sencillo para estimar v con buena precisión utilizando el propio sistema de medida. La velocidad del punto de contacto rueda-carril es $v_Q = v$ mientras la rodadura se produce por la parte circular de la rueda. Durante la irregularidad, $v_Q \neq v$, pero ésta es de una longitud mucho menor que el desarrollo de la rueda. Además, puesto que la velocidad media a lo largo de, al menos, la irregularidad $\bar{v}_Q = v$, basta calcular el promedio de la velocidad del punto de contacto durante un intervalo suficientemente largo (media móvil) para obtener una buena estimación de la velocidad v .

El punto de contacto avanza una distancia $\Delta x_{Q(i)}$ entre dos disparos consecutivos, siendo $x_{Q(i)}$ la posición de Q en el instante de tiempo:

$$t_{(i)} = i T_{PRF} + \frac{T_{Q(i)}}{2} \quad (2.5.8)$$

en el siguiente disparo la posición de Q se encuentra en un tiempo:

$$t_{(i+1)} = (i+1) T_{PRF} + \frac{T_{Q(i+1)}}{2} \quad (2.5.9)$$

⁷Estrictamente, durante un tiempo mayor que el invertido en el tránsito de la irregularidad

La diferencia entre las medidas de tiempo (2.5.8) y (2.5.9) es:

$$\Delta t_{(i)} = T_{PRF} + \frac{\Delta T_{Q(i)}}{2} \quad (2.5.10)$$

Considerando que en este intervalo temporal la velocidad de Q es constante e igual a $v_{Q(i)}$, el avance del punto de contacto es:

$$\Delta x_{Q(i)} = v_{Q(i)} \Delta t_{(i)} \quad (2.5.11)$$

Por otra parte, el tiempo empleado por el ultrasonido para cubrir la distancia avanzada por el punto de contacto es:

$$\Delta T_{Q(i)} = 2 \frac{\Delta x_{Q(i)}}{c} \quad (2.5.12)$$

donde c es la velocidad de propagación del ultrasonido y es constante en el carril de medición. Sustituyendo (2.5.11) en (2.5.12), y con (2.5.10) se tiene:

$$\Delta T_{Q(i)} = 2 \frac{v_{Q(i)} \Delta t_{(i)}}{c} = 2 \frac{v_{Q(i)}}{c} \left(T_{PRF} + \frac{\Delta T_{Q(i)}}{2} \right) \quad (2.5.13)$$

reordenando:

$$\Delta T_{Q(i)} \left(\frac{c - v_{Q(i)}}{c} \right) = 2 \frac{v_{Q(i)}}{c} T_{PRF} \quad (2.5.14)$$

El factor $(c - v_{Q(i)})/c$ es el desplazamiento Doppler entre la frecuencia $1/T_{PRF}$ a la que se emiten los pulsos de interrogación y la frecuencia a la que se reciben. Al ser $v_{Q(i)} \ll c$, se puede asumir que el factor $(c - v_{Q(i)})/c \approx 1$. Entonces de (2.5.14) se obtiene que la velocidad del punto de contacto $v_{Q(i)}$ es:

$$v_{Q(i)} \approx \frac{\Delta T_{Q(i)}}{2 T_{PRF}} c \quad (2.5.15)$$

En (2.5.15) todos los valores son conocidos y el valor $\Delta T_{Q(i)}$ resulta de la diferencia en la medida de dos tiempos de vuelo en pulsos consecutivos. El valor de $v_{Q(i)}$ representa la estimación de la velocidad instantánea del punto de contacto al enviar el pulso i . La velocidad del tren v se estima mediante un proceso de media móvil:

$$v \approx \tilde{v}_{Q(j)} = \frac{1}{N} \left(\sum_{i=j}^{i=j+N-1} v_{Q(i)} \right) \quad (2.5.16)$$

donde N es un valor programable suficientemente grande para abarcar la longitud de la mayor irregularidad y lo suficientemente pequeño para mantener un transitorio corto. Durante el transitorio inicial que comprende las $N - 1$ primeras medidas, el promedio se puede extender al total de medidas realizadas.

Cuando la rueda está en perfecto estado, los valores medidos $v_{Q(i)}$ deben ser iguales a la velocidad estimada v y los valores diferenciales de los tiempos de vuelo, $\Delta T_{Q(i)}$ serán iguales para todos los disparos a:

$$\Delta T_{Q(i)} = T_{Q(i+1)} - T_{Q(i)} = \frac{2v}{c} T_{PRF} \left(\frac{c}{c-v} \right) \approx \frac{2v}{c} T_{PRF} = \frac{2\Delta x}{c} \quad (2.5.17)$$

donde $\Delta x = v T_{PRF}$ es el intervalo espacial de muestreo. Cuando la rueda circula sobre una irregularidad, los valores de $\Delta T_{Q(i)}$ oscilarán alrededor de este valor. La longitud de la irregularidad puede estimarse a partir del número n de disparos consecutivos en los que las medidas $\Delta T_{Q(i)}$ se apartan de la constante anterior, como:

$$L_H = n v T_{PRF} \quad (2.5.18)$$

El valor de L_H corresponde a la longitud de la irregularidad actual, pero se desconoce la del plano original L , ya que no hay información del nivel de desgaste. Tampoco es posible determinar con este método la pérdida de radio d , que es la causa principal de las fuerzas de impacto, daños en las estructuras y ruido acústico.

Para determinar la pérdida de radio d y la longitud del plano original L es preferible utilizar el proceso descrito anteriormente, utilizando la ecuación (2.3.34) que se repite aquí por comodidad:

$$d(\alpha) = \int_{\alpha}^{\alpha+\varphi_A} s(\varphi) d\varphi \quad 0 \leq \alpha \leq \text{máx}(\varphi) - \varphi_A$$

Teniendo en cuenta que $\Delta\varphi = \omega \Delta t = v T_{PRF}/R = \Delta x/R$ y, sustituyendo la integral anterior por un sumatorio de medidas discretas sobre un intervalo de M muestras:

$$d_k = \frac{v T_{PRF}}{R} \sum_{i=k}^{k+M} s_i(\varphi) \quad (2.5.19)$$

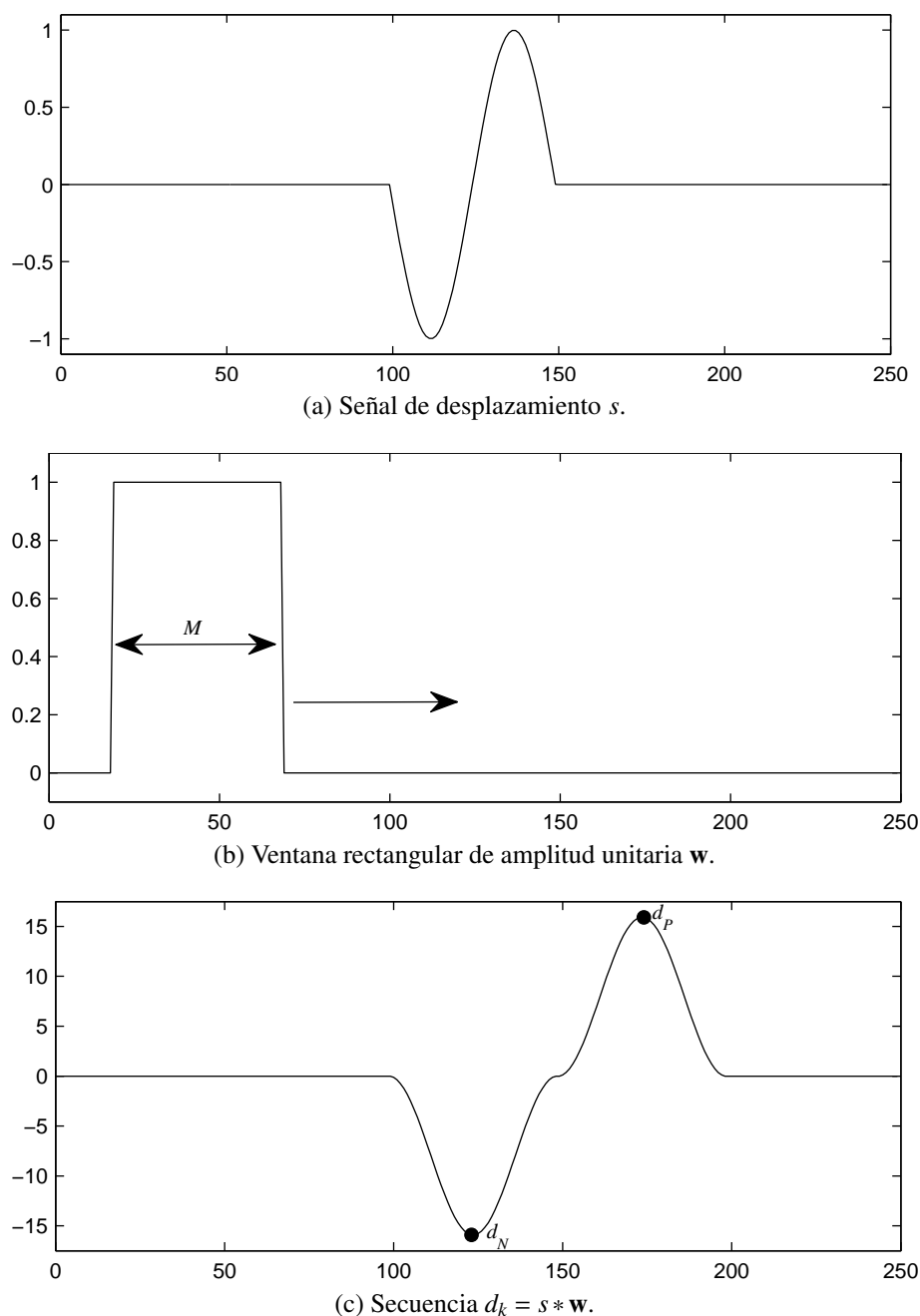


Figura 2.15: Representación gráfica del proceso de obtención de d_k mediante la convolución de s con una ventana rectangular de amplitud unitaria y anchura M . Unidades arbitrarias.

El proceso indicado por (2.5.19) se muestra gráficamente en la Figura 2.15, donde se realiza la convolución de la señal adquirida s con una ventana rectangular w de anchura M muestras. El resultado es la secuencia d_k que, para un plano simple, presenta un mínimo d_N y un máximo d_P cuyos valores absolutos o su promedio es una estimación de la pérdida de material d según (2.3.36) y (2.3.35):

$$\begin{aligned} d_N &= -\min[d_k] \\ d_P &= \max[d_k] \\ d_e &= \frac{d_N + d_P}{2} \end{aligned}$$

Por otra parte el producto $v T_{PRF} = \Delta x$, presente en (2.5.19), representa el intervalo espacial de muestreo y determina la resolución en longitud de la irregularidad L . La resolución en profundidad d es mayor al realizarse la integración de M valores. El número M debe ser suficientemente grande como para capturar la mayor irregularidad de interés (longitud L_{max}):

$$M \geq \frac{L_{max}}{2\Delta x} = \frac{L_{max}}{2v T_{PRF}} \quad (2.5.20)$$

A partir del valor calculado d_e , la longitud del plano original se estima de la geometría de una cuerda de circunferencia (ver Sección §2.4) como:

$$L_e = 2 \sqrt{2R d_e - d_e^2} \approx \sqrt{8R d_e} \quad (2.5.21)$$

Para ilustrar el proceso de medida, la Figura 2.16a muestra un ejemplo por simulación del valor obtenido de s para un plano degenerado, resultante de uno original con $d = 0.4\text{mm}$ en el desarrollo de una rueda de $R = 500\text{mm}$, que proporciona $L = 40\text{mm}$ según (2.5.21). Las medidas se toman a intervalos $\Delta x = v T_{PRF} = 0.6\text{mm}$ en el movimiento de la rueda sobre el carril. Se observa que la amplitud de la oscilación de s apenas alcanza los 6mm , muy por debajo de los 40mm que se obtendrían con un plano nuevo (Sección §2.4.1).

En la Figura 2.16b se muestra gráficamente la secuencia d_k obtenida por aplicación de (2.5.19) con $M = 267$. Aquí se ven claramente los dos picos, negativo y positivo, ambos de amplitud $d_P = d_N = 0.4\text{mm}$, que corresponde a la pérdida de radio del plano nuevo.

La Figura 2.17a muestra el mismo caso con un alto contenido de ruido blanco gaussiano, modelado con amplitud creciente con la distancia x , como sucede en las medidas reales cuando se activa la función de *compensación de la atenuación con la distancia (CAD)* para mantener una sensibilidad suficiente para el registro de los ecos más lejanos.

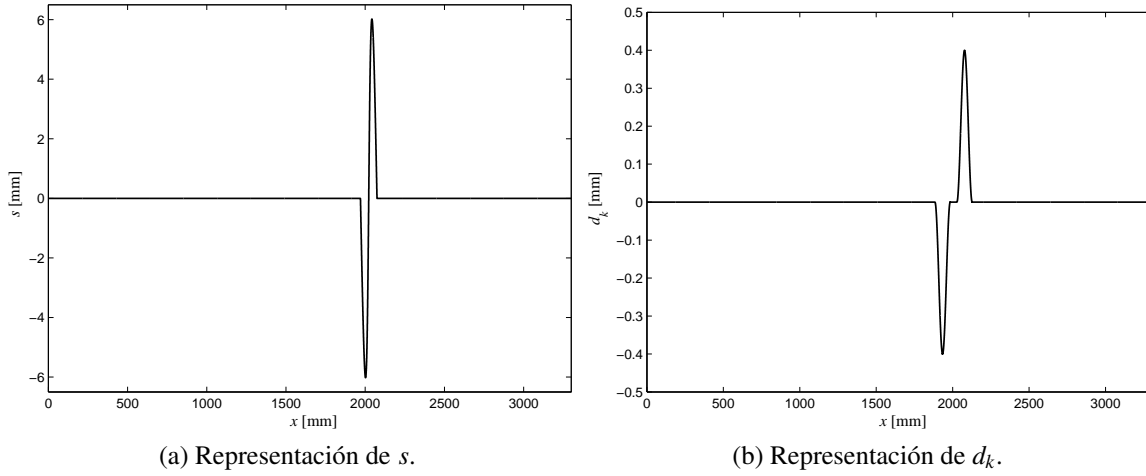


Figura 2.16: Simulación del proceso de medida ($R=500$, $d=0.4\text{mm}$, $M=267$).

En la Figura 2.17b se representa gráficamente la secuencia d_k para esta señal ruidosa. Se ven claramente los dos picos sobre el ruido residual, cuyas amplitudes son:

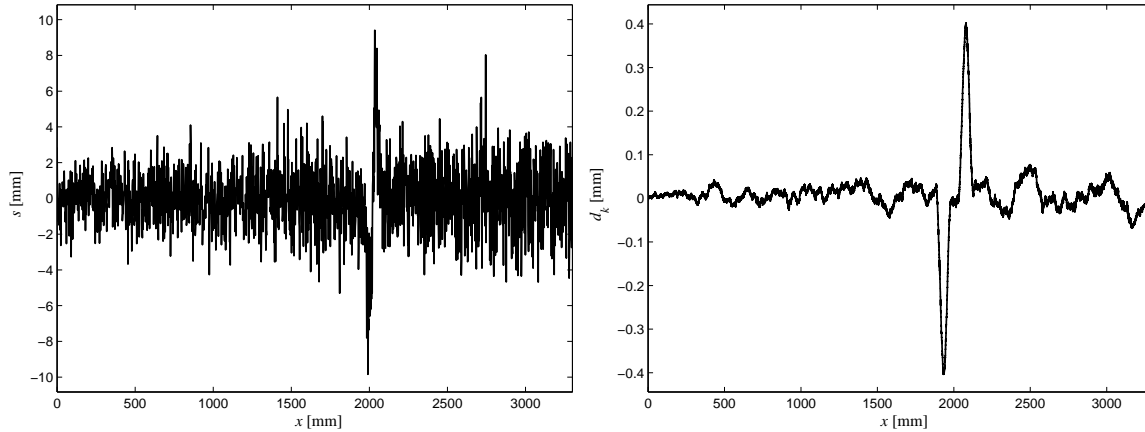
$$\begin{aligned} d_N &= 0.4037 \\ d_P &= 0.4019 \end{aligned} \quad (2.5.22)$$

con lo que el valor medio resulta en $d_e=0.4028\text{mm}$. Sustituyendo en (2.5.21) resulta una estimación $L_e = 40.12\text{mm}$, que difiere muy poco de los 40mm reales.

El error en la estimación de la longitud del plano original se debe a la presencia de ruido. Sin embargo se comprueba la robustez del método incluso para muy bajas relaciones señal/ruido.

Por otra parte la estimación de d y de L , requiere conocer el radio R de la rueda. En las condiciones de una aplicación real se conoce el valor nominal de R , pero no el valor para la rueda actual, donde puede ser menor a consecuencia del desgaste. Las estimaciones, al ser proporcionales a R , están sesgadas, esto es, los valores estimados utilizando el valor nominal del radio son mayores o iguales a los reales.

No obstante, el error es bajo, ya que la máxima variación de radio admisible en una rueda de tren es un pequeño porcentaje del nominal (típicamente $< 10\%$). En cualquier caso, la estimación realizada es conservadora y representa el caso más desfavorable si no se consideran otras posibles causas de error.



(a) Representación de s contaminada con ruido blanco gaussiano.

(b) Secuencia d_k resultante.

Figura 2.17: Simulación del proceso de medida con señal ruidosa. ($R=500$, $d=0.4\text{mm}$, $M=267$)

2.6. Elección de la ventana de integración

La estimación de la pérdida de radio d en sistemas muestreados requiere elegir un valor de M adecuado. Estrictamente, M debe ser superior al número de muestras que forman un semiciclo de s para realizar una estimación robusta de d cuando sólo existe una irregularidad. Para considerar la presencia de múltiples planos próximos entre sí, es evidente que el valor de M debe ajustarse, en cada caso, al tamaño del plano respectivo. El problema es que, en presencia de ruido, es difícil conocer la extensión de s y, por tanto, no se puede establecer un valor *óptimo* de M .

La alternativa es clara: dado que no se puede conocer *a priori* la extensión de s y que, además, pueden existir múltiples irregularidades de diferentes tamaños y próximas entre sí, debe realizarse un proceso heurístico que prueba diferentes tamaños de ventanas en cada adquisición.

Afortunadamente el procesamiento es sencillo (equivalente a una media móvil) pudiendo implementarse en hardware para obtener resultados en tiempo real, puesto que los recursos requeridos no son excesivos para el nivel de integración de la tecnología actual (FPGAs, ASICs, etc.). Para ello, los valores calculados de $s_{(i)}$, (ecuación 2.5.7), son procesados por múltiples integradores con diferentes ventanas.

Su realización software puede hacerse en el intervalo de tiempo que media en el paso de dos bogies consecutivos (varios segundos) o posponerse al paso del tren completo y realizarse *off-line*. En este caso basta almacenar las trazas ultrasónicas adquiridas, con un mínimo coste en recursos hardware.

Independientemente del método utilizado, los resultados obtenidos con ventanas de diferente tamaño deben ser *coherentes*. En otras palabras, las medidas realizadas con ventanas diferentes de un plano aislado deben ser similares en presencia de ruido.

El análisis se realizará en dos partes:

- ✧ Coherencia de las medidas para planos simples.
- ✧ Detección y medida de planos múltiples.

2.6.1. Coherencia de las medidas para planos simples

La Figura 2.18a muestra la simulación de una adquisición de s a intervalos $\Delta x = 0.5\text{mm}$. El plano degenerado resulta del desgaste con $\xi = 1.7$ de un plano original en el que $d = 0.4\text{mm}$, $L = 40\text{mm}$, y $R = 500\text{mm}$. La longitud del plano degenerado es $L_H \approx \xi L = 68\text{mm}$.

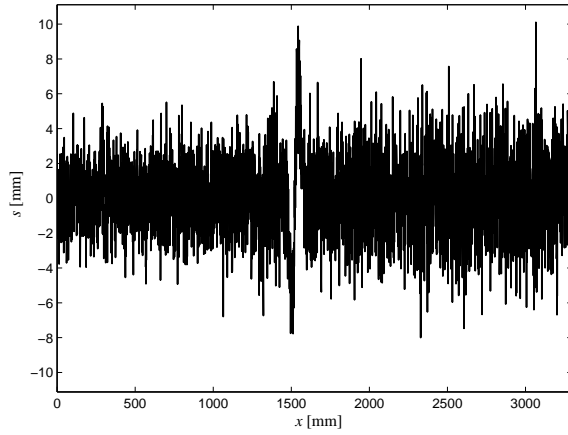
Como en el caso presentado en la Figura 2.17, se ha añadido una importante cantidad de ruido gaussiano de media cero y desviación estándar creciente con la distancia. El ruido resulta de errores en la determinación de la posición de la señal de eco, debidos a diversos factores que se analizan posteriormente. En la Figura 2.18b se muestra la secuencia d_k obtenida por aplicación de (2.5.19) con $M = 640$ muestras (320mm).

Se pretende analizar las variaciones en la estimación d_e de d y L_e de L_H al variar el tamaño de la ventana de integración. Para ello, la adquisición se integra con múltiples ventanas de diferentes longitudes ($1 \leq M_x \leq 320\text{mm}$ o, equivalentemente, $2 \leq M \leq 640\text{muestras}$), con la conversión de muestras a distancia mediante $M_x = M \Delta x = M(\nu T_{PRF})$. Para cada ventana se obtiene una secuencia d_k y la estimación d_e por aplicación de (2.3.37).

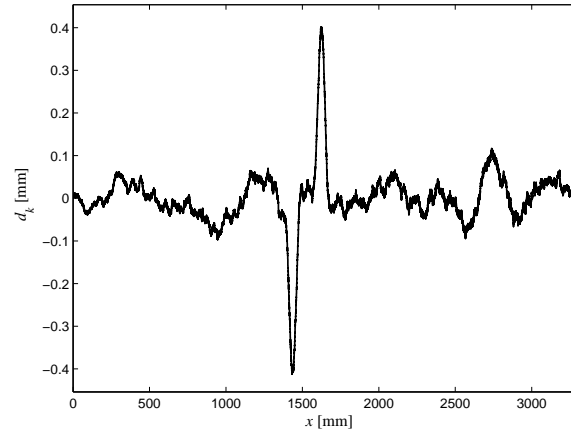
Los resultados se muestran en la Figura 2.18c. Se observa que, para $M_x = L_H/2 = 34\text{mm}$ se obtiene una estimación próxima a la correcta, $d_e = 0.35\text{mm}$. Para valores $M_x < L_H/2$ se produce un error por defecto en la estimación d_e respecto al valor verdadero d que crece rápidamente. Para $M_x > L_H/2$ el valor d_e oscila alrededor del valor verdadero $d = 0.4$, en este caso con un valor medio de 0.395mm y desviación estándar de 0.077mm .

La Figura 2.18d muestra la estimación de la longitud del plano original L_e a partir de los valores d_e por aplicación de (2.5.21). Lógicamente el comportamiento es similar al de d_e , con errores por defecto crecientes para menores valores de $M_x \leq L_H/2$, mientras que se estabiliza para $M_x > L_H/2$ muy próximo al valor real $L = 40\text{mm}$. La media estimada para todas las ventanas consideradas con $M_x \geq L_H/2$ es $L_e = 39.42\text{mm}$ con una desviación estándar de 0.35mm .

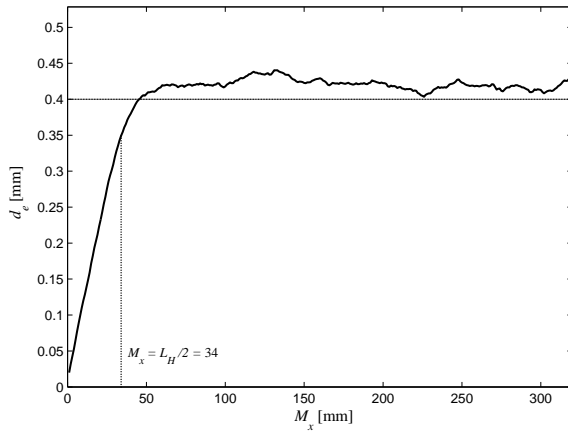
Estos resultados confirman que las estimaciones d_e y L_e son coherentes para tamaños de la ventana de integración mayores que la mitad de la longitud del plano, como cabe esperar del



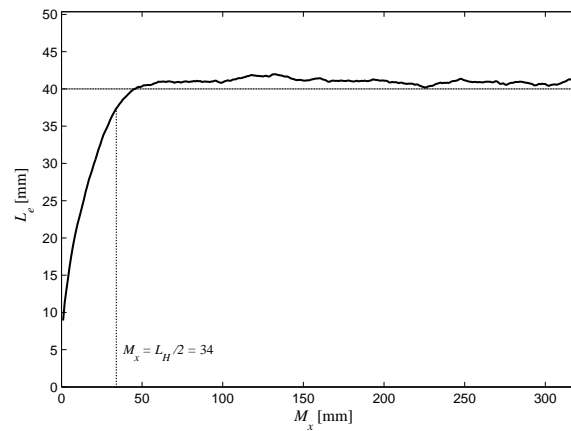
(a) Representación de s contaminada con ruido blanco gaussiano.



(b) Secuencia d_k resultante con $M_x = 320$ mm.



(c) Pérdida de radio estimada d_e .



(d) Longitud del plano inicial estimada L_e .

Figura 2.18: Simulación del proceso de medida: plano original $L = 40$ mm, $d = 0.4$ mm, $R = 500$ mm. (a) Señal s contaminada de ruido, adquirida a $\Delta x = 0.5$ mm. (b) Secuencia resultante de convolucionar s con la ventana de integración w de ancho $M_x = 320$ mm. (c) y (d) Estimaciones de la pérdida de radio y largo del plano inicial en función del tamaño M_x de la ventana de integración w .

procesamiento realizado por aplicación de (2.5.19). Los errores aumentan rápidamente si la longitud de la ventana de integración es inferior al valor indicado. De ello se deduce que es preferible utilizar *ventanas de integración grandes* para planos simple.

2.6.2. Medidas con múltiples planos

La convolución realizada para estimar el valor de d en planos simples, puede dar resultados erróneos cuando existen múltiples planos próximos entre sí. En efecto, la ventana de integración puede abarcar las indicaciones s de varios planos, incluyendo en la integración partes de los ciclos positivos y negativos de s , pertenecientes a distintos planos, que tienden a cancelarse. De este modo los valores estimados pueden ser inferiores a los reales.

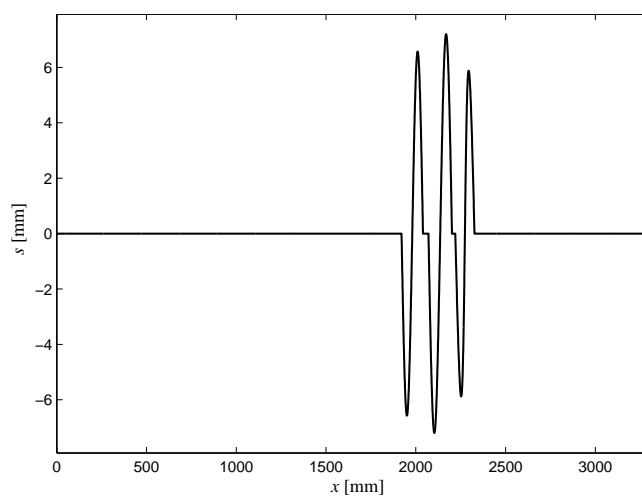
Para ilustrar este hecho, la Figura 2.19a muestra la señal s obtenida de tres planos próximos, a intervalos de 157mm, cuyas pérdidas de material son $d = 0.5, 0.6$, y 0.4 mm, respectivamente, en una rueda con $R = 500$ mm. Las longitudes correspondientes de los planos originales son $L = 44.7, 49$, y 40 mm. Considerado un grado de desgaste uniforme, $\xi = 1.7$, para los tres casos, las longitudes de los planos degenerados son $L_H = 76, 83.3$, y 68 mm. Con el intervalo elegido de 157mm, no existe solapamiento entre los planos degenerados.

La Figura 2.19b muestra la secuencia d_k obtenida al aplicar (2.5.19) con una ventana de integración $M_x = 150$ mm (inferior al intervalo entre los planos). De esta gráfica se pueden hacer las siguientes observaciones:

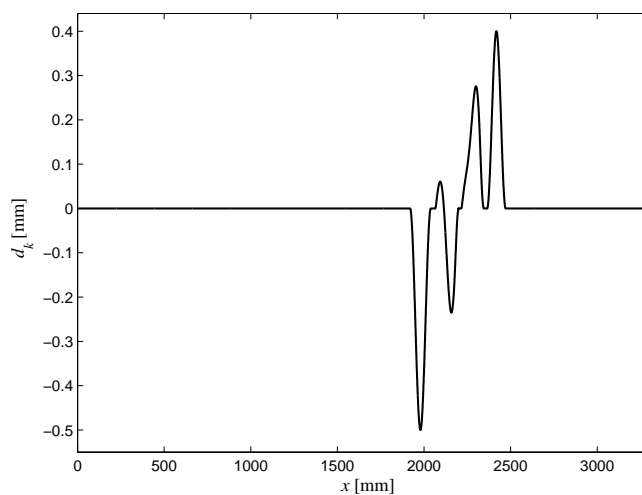
- ✧ El primer pico negativo tiene una amplitud correcta (0.5mm) para el primer plano. Asimismo, el último pico positivo también tiene una amplitud correcta (0.4mm) para el último plano.
- ✧ En ningún caso se dispone de información relativa al plano intermedio (0.6mm), más bien las indicaciones intermedias darían un plano con $d \approx 0.25$. De hecho, la medida de la irregularidad más grande es incorrecta.

Estos efectos son consecuencia de la interferencia entre valores de s que corresponden a distintos planos al realizar la convolución. En efecto, dado el tamaño de la ventana M_x se combinan zonas positivas y negativas de s para planos consecutivos, mientras que los ciclos extremos se evalúan correctamente.

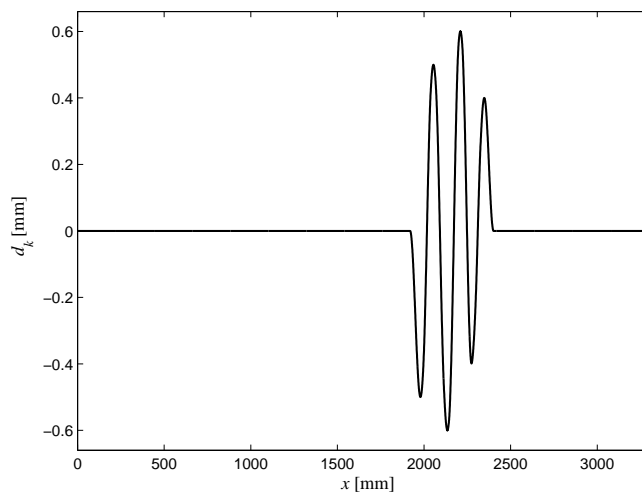
Ahora se repite la simulación con los mismos datos de los planos, pero modificando el tamaño de la ventana haciendo $M_x = 75$ mm (la mitad que en el caso anterior). La Figura 2.19c muestra la secuencia d_k obtenida, donde se aprecia que se evalúa correctamente la pérdida de material d de todos los planos ($d_{Pi} = d_{Ni} = d_i$).



(a) Señal s producida por planos múltiples.

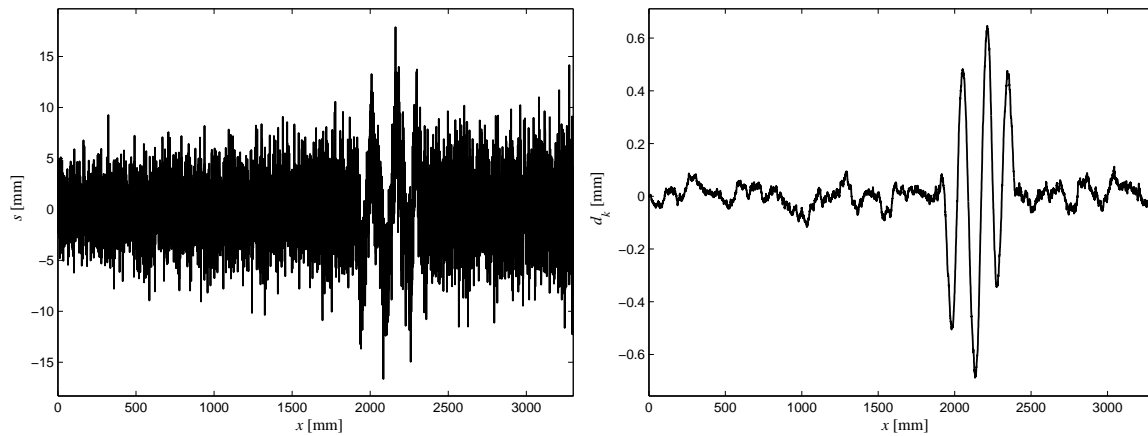


(b) Secuencia d_k obtenida con $M_x=150$ mm.



(c) Secuencia d_k obtenida con $M_x = 75$ mm.

Figura 2.19: Simulación de medidas con 3 planos próximos con $d=(0.5, 0.6, 0.4)$ mm y grado de desgaste $\xi = 1.7$.



(a) Señal s ruidosa y producida por planos múltiples. (b) Procesamiento con $M_x=75\text{mm}$, resultando en una buena estimación de la pérdida individual de radio.

Figura 2.20: Simulación de medidas con ruido y 3 planos próximos con $d=(0.5, 0.6, 0.4)\text{mm}$ y grado de desgaste $\xi=1.7$.

Debido a que el procesamiento es una convolución, la condición necesaria y suficiente para que no se produzcan interferencias destructivas es que la anchura de la ventana de integración M_x sea menor o igual a la distancia entre planos consecutivos (distancia desde el final de un plano hasta el comienzo del siguiente).

El método es robusto frente al ruido en s (incertidumbre de posición), como muestra la Figura 2.20a. La Figura 2.20b muestra la secuencia d_k obtenida para esta señal. Extrayendo los valores de pico negativos (d_N) y positivos (d_P) para cada plano individual y realizando el promedio, proporciona los resultados de la Tabla 2.1.

Obsérvese que el error obtenido en la estimación individual de los planos es muy bajo a pesar del elevado contenido de ruido en la señal s . La búsqueda individualizada de los picos en d_k se facilita por el hecho de que el positivo sucede al negativo.

Existen dos criterios para la elección del tamaño M_x de la ventana de integración:

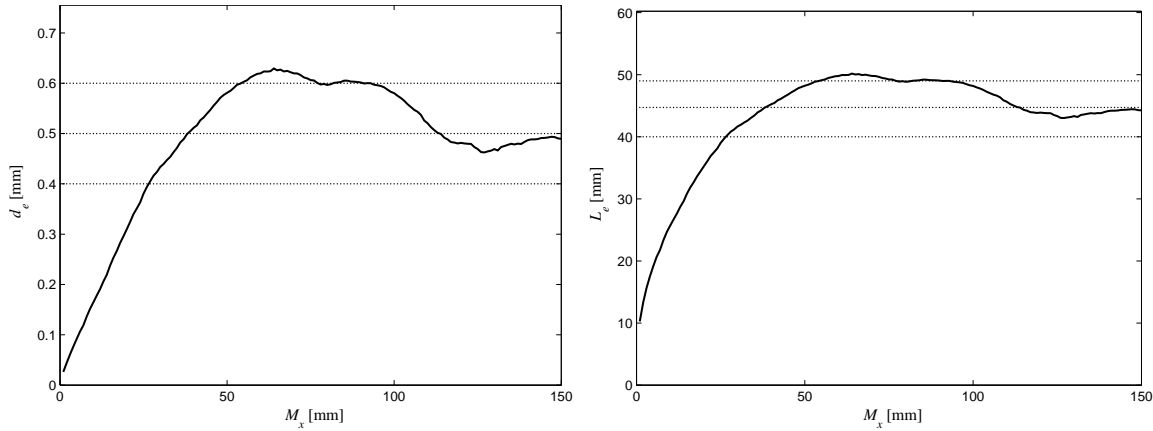
1. Ha de ser mayor que la extensión del mayor plano desgastado de interés.
2. Ha de ser menor que el intervalo entre dos planos desgastados.

Aunque parecen condiciones contradictorias, en la práctica pueden resolverse ya que los planos múltiples aparecen habitualmente a intervalos mucho mayores que su longitud, como se expuso en la Sección §1.4.3 (planos múltiples por fallos periódicos del ABS).

Sin embargo, desde el punto de vista del mantenimiento ferroviario, interesa determinar con

Plano	d [mm]	d_N [mm]	d_P [mm]	d_e [mm]	L [mm]	L_e [mm]	$\varepsilon(L)$
1	0.5	0.497	0.505	0.501	44.7	44.7	+0.1 %
2	0.6	0.654	0.596	0.625	49.0	50.0	+2.0 %
3	0.4	0.451	0.434	0.442	40.0	42.0	+5.1 %

Tabla 2.1: Evaluación de 3 planos próximos.



(a) Estimación de la pérdida de radio mediante múltiples ventanas.

(b) Longitud estimada del plano original.

Figura 2.21: Estimación de la pérdida de radio y de la longitud del plano inicial para señales con planos múltiples (las líneas de trazos representan las dimensiones nominales de las 3 irregularidades.).

precisión la *mayor de las irregularidades*, pues ésta es la que determina si la rueda debe reperfilarse o ser retirada del servicio. A partir de la mayor pérdida de material se puede determinar la profundidad de torneado, eliminando también las irregularidades menores. La estimación se hace mediante el procesamiento con múltiples ventanas:

$$d_{e_{max}} = \max [d_e(M)] \quad (2.6.1)$$

La función $d_e(M)$ proporciona la estimación de la pérdida de material para cada ancho de ventana. La Figura 2.21a muestra la gráfica de $d_e(M)$ para el ejemplo anterior (con ruido) y la 2.21b la longitud estimada del plano original $L_e(M)$. El máximo de ambas gráficas proporciona, a su vez, una estimación de las características de la mayor de las irregularidades: $\max [d_e(M)] = 0.63\text{mm}$, $\max [L_e(M)] = 50.18\text{mm}$, valores próximos a los máximos nominales ($d = 0.6\text{mm}$ y $L = 49\text{mm}$, respectivamente).

2.7. Medidas en condiciones reales: Ruido estructural

La señal $s_{(i)}$ representa las medidas del tiempo de vuelo en ida y vuelta del transductor al punto de contacto $T_{Q(i)}$ en la posición i de la rueda y viene dada por la ecuación (2.5.7):

$$s_{(i)} = \frac{c T_{Q(i)}}{2} - i v T_{PRF}$$

Como c y T_{PRF} (velocidad de propagación e intervalo entre pulsos, respectivamente) son constantes y la velocidad del tren v se puede considerar también constante en el intervalo de medida, el ruido en $s_{(i)}$ se debe únicamente a la incertidumbre en la determinación del tiempo de vuelo $T_{Q(i)}$.

El tiempo de vuelo se mide desde el instante en que se excita el transductor hasta que llega a éste el eco del punto de contacto. El instante de llegada del eco se determina buscando el máximo dentro de una ventana de adquisición en un intervalo temporal determinado. Si la amplitud del eco es suficientemente grande respecto al fondo de ruido, este método proporciona una medida precisa del tiempo de vuelo $T_{Q(i)}$, con una resolución limitada por el periodo de un reloj maestro de alta frecuencia (al menos, la frecuencia de muestreo de la señal de eco).

La *amplitud* de la señal de eco no interviene directamente en (2.5.7), sino su *posición* (tiempo de vuelo). Esta medida puede verse afectada por interferencias con otras señales (ruido eléctrico inducido y ruido estructural).

El ruido eléctrico es el conjunto de perturbaciones de la señal de eco por efectos de agitación térmica en la electrónica o fenómenos electromagnéticos inducidos desde el exterior que contaminan la señal. El ruido estructural es el generado por la estructura de grano del material (*dispersores*) por el que se propaga la señal ultrasónica. Además, la generación de múltiples modos de propagación (ondas dispersivas, Sección §1.5.3) producen indicaciones que, para esta aplicación, pueden asimilarse a ruido estructural.

La Figura 2.22 muestra esquemáticamente la *reflectividad* de los dispersores en un fragmento del carril de medida, con distribución normal de amplitudes y uniforme de posición en el sentido longitudinal. Constituye la *respuesta al impulso* del medio de propagación.

Al emitir un pulso ultrasónico por este medio, los dispersores generan ecos en múltiples direcciones. Parte de la señal dispersada regresa al transductor, donde se muestra como un ruido que contamina el débil eco del punto de contacto rueda-carril.

Mientras que el ruido eléctrico puede combatirse con técnicas convencionales de filtrado y métodos de cancelación de ruido EMI [Fritsch et al., 2006], el ruido estructural aparece en la misma banda de frecuencias de la señal (puesto que también son señales de eco) y no puede eliminarse del mismo modo.

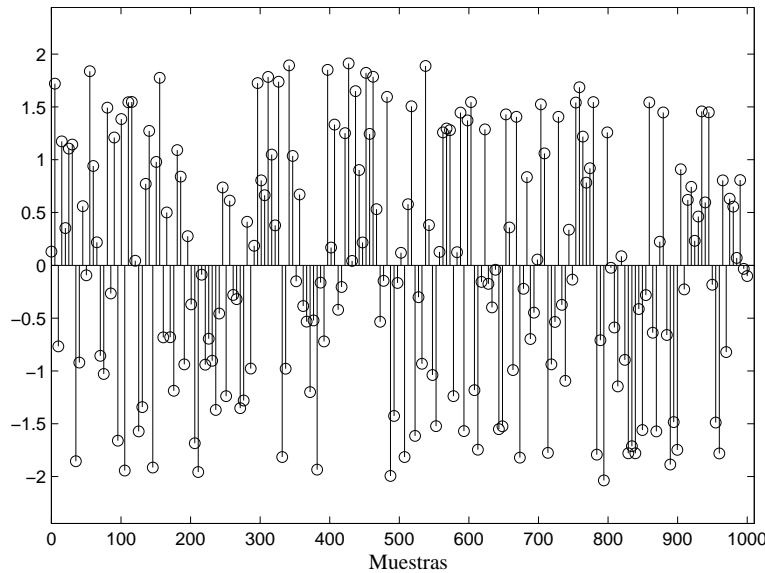


Figura 2.22: Distribución de amplitudes (normal) y de posición (uniforme) en un fragmento de carril. Unidades arbitrarias.

Existen diversos trabajos dirigidos a la cancelación de ruido estructural, entre los que destacan la técnica de procesamiento de espectro partido - SSP, *split-spectrum processing*, [Gustafsson, 1995; Newhouse et al., 1982] - y otras más recientes obtenidas por nuestro grupo (procesamiento por coherencia de fase, [Camacho et al., 2009a,b; Fritsch et al., 2010].

Estas técnicas requieren un proceso interactivo de ajuste de los parámetros del algoritmo SSP o tecnología *phased array* (coherencia de fase). La actual aplicación se basa en transductores monoelemento y no es posible la intervención del operador para ajustar los parámetros de rechazo óptimo del ruido estructural.

La Figura 2.23a muestra un modelo de señal típica emitida por un transductor monoelemento (envolvente gaussiana, portadora de 1MHz, ancho de banda relativo del 20 %, muestreada a 10MHz), normalizada a la unidad y centrada en el origen de tiempos. La Figura 2.23b muestra el resultado de convolucionar esta señal con el ruido estructural del carril, mostrado en la Figura 2.22, que resulta en una traza ruidosa.

En estas condiciones se produce el débil eco del contacto rueda-carril, que se suma a la señal anterior. Las Figuras 2.23c y 2.23d muestran la señal resultante en dos posiciones diferentes de la rueda dentro del tramo de carril considerado. La rueda se supone perfectamente circular, por lo que la señal s debería ser nula.

Para evitar en lo posible la influencia del ruido estructural, se realiza un seguimiento del eco haciendo la adquisición en un entorno del valor de pico de la señal (ventana de adquisición). La ventana de adquisición se desplaza a la misma velocidad que la rueda, esperando que el pico

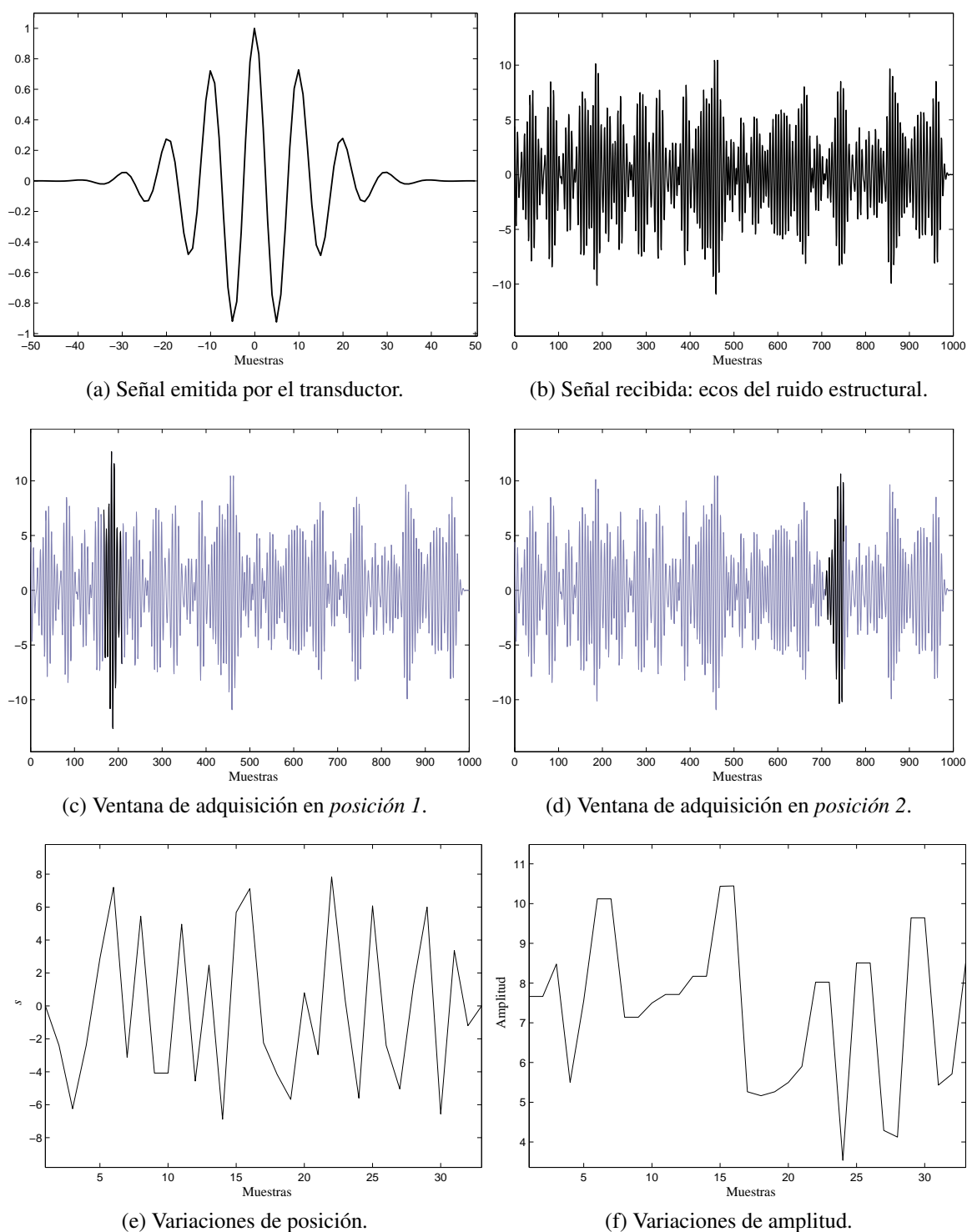


Figura 2.23: Simulaciones de las condiciones de medición. (a) Pulso ultrasónico emitido, de envolvente gaussiana de 1MHz, ancho de banda relativo del 20%, muestreado a 10MHz. (b) Señal recibida contaminada de ruido estructural. (c) y (d) Señal dentro de la ventana de adquisición en distintas posiciones del carril. (e) y (f) Variaciones en las medidas a consecuencia del ruido estructural.

del eco se sitúe, aproximadamente, en el centro de la ventana.

Sin embargo, las interferencias del ruido estructural y modos de propagación, en especial ondas de Lamb y otras, provocan variaciones de posición. En las Figuras 2.23c y 2.23d se muestra en color oscuro la señal contenida en la ventana de adquisición (de 32 muestras en este ejemplo). Se observa que la posición del pico varía en función de la interferencia con el ruido de grano.

La Figura 2.23e muestra la función s obtenida de aplicar (2.5.7). Aquí se observan más claramente las variaciones alrededor de 0, que resultan de la incertidumbre en la determinación del tiempo de vuelo a causa de las interferencias con el ruido estructural. En la Figura 2.23f se muestra la variación de amplitud de la señal de eco.

2.8. Discusión y conclusiones

Cuando una rueda se mueve sobre una irregularidad plana, aparece una distancia s entre el punto de contacto y la proyección del centro de la rueda sobre el carril. El desplazamiento s en función del ángulo de giro φ presenta un semiciclo negativo seguido de otro positivo, y el área encerrada bajo la curva $s(\varphi)$ es igual a dos veces la pérdida de radio o flecha. Estos resultados dieron origen a la formulación del *Teorema de la pérdida de radio*, con el cual se puede determinar la longitud del plano original en función de s .

Se utilizó la función *haversine* como herramienta para modelar una irregularidad plana en sus diferentes etapas de degeneración y estudiar la cinemática del punto contacto rueda-carril en cada caso. Se encontró que la longitud del plano se puede determinar midiendo la amplitud pico a pico de la oscilación de s cuando la irregularidad es nueva o de reciente formación. Sin embargo la amplitud de las oscilaciones disminuyen conforme aumenta el grado de desgaste de la irregularidad perdiendo relación con la longitud del plano inicial. No obstante, frente a esta situación, la utilización del teorema de la pérdida de radio es independiente del nivel de desgaste y proporciona de manera fiable el valor de d . Luego, mediante una simple relación geométrica, se puede determinar la longitud del plano inicial.

Se describieron dos métodos dinámicos de medida para obtener $s(\varphi)$. Ambos utilizan un carril especial de medida totalmente caracterizado sobre el que se envían ondas ultrasónicas superficiales, y registran por medio de un transductor receptor el eco generado por el punto de contacto. La presencia de las irregularidades se determinan midiendo los cambios en la velocidad de desplazamiento del punto de contacto.

La primera propuesta es un método de emisión continua y recupera la frecuencia Doppler generada por el desplazamiento del punto de contacto rueda-carril. Cuando la velocidad del punto de contacto es constante y banda de rodadura está en perfectas condiciones, la frecuencia Doppler

también es constante y proporcional a la velocidad del tren. Pero, si el punto de contacto presenta alguna irregularidad la frecuencia Doppler mostrará variaciones respecto a la nominal. Con este método se pueden detectar defectos superiores a 30mm de manera fiable, sin embargo no ofrece suficiente precisión para dimensionarlos.

La segunda alternativa de medida es una técnica de pulso-eco. Los tiempos de vuelo de los pulsos de interrogación se miden desde el transductor al punto de contacto a intervalos regulares. Incrementos constantes en los tiempos de vuelo indican una banda de rodadura en buenas condiciones, mientras que cualquier variación en esta regularidad pone de manifiesto la presencia de algún defecto. Con esta técnica es posible dimensionar las irregularidades, ya que se consigue una mejor resolución y una mayor precisión que la que se obtiene utilizando técnica Doppler.

El uso de un sistema discreto para la obtención de $s(\varphi)$, condiciona a aplicar el teorema de la pérdida de radio mediante un sumatorio de las medidas discretas de s sobre un intervalo de M muestras. En forma práctica se explota el concepto de convolucionar las medidas de s con una ventana rectangular w de amplitud unitaria y anchura M .

En las simulaciones efectuadas del proceso de medida, se tuvieron en cuenta situaciones reales que afectan a la calidad de la señal adquirida (interferencias de ruido eléctrico y con el ruido estructural del carril), y el empleo del teorema de la pérdida de radio para estimar la profundidad del defecto d y la longitud del plano inicial L resultó muy robusto.

El valor más apropiado de M para la ventana de integración, debe ser por lo menos superior al número de muestras que forman un semiciclo de s . Sin embargo esto es válido sólo para planos aislados. Cuando se trata de planos múltiples y próximos entre sí, el valor de M debería ser menor o igual a la distancia entre planos consecutivos. Por tanto, como no puede conocerse *a priori* el estado de la rueda a inspeccionar, el tamaño de M se obtiene mediante un proceso heurístico que prueba diferentes tamaños de ventanas de integración en cada señal s . De este proceso interesa la mayor de las estimaciones, pues se vincula con el defecto de mayor profundidad, y desde el punto de vista del mantenimiento ferroviario, este valor determina la profundidad de torneado, eliminando las irregularidades menores.

La técnica de medición para la detección de planos resulta novedosa e innovadores y puede adaptarse bien al ambiente ferroviario, operando a la intemperie y en condiciones climáticas adversas. Por otra parte el proceso de evaluación de los defectos resulta sencillo y puede ser implementado en hardware (FPGAs, ASICs, etc.) para obtener resultados en tiempo real haciendo nulo en tiempo el coste de la inspección.

Procedimiento de medida

En el capítulo anterior se establecieron las bases teóricas para detectar y medir planos en la superficie de rodadura de ruedas de tren en marcha lenta. Asimismo se describieron los principios básicos del método propuesto: envío de un pulso ultrasónico en forma de onda de Rayleigh por la superficie de un carril de medida, detección del eco producido por el contacto rueda-carril y evaluación de defectos.

El teorema de la pérdida de material, presentado en el capítulo anterior, constituye el fundamento para la estimación de la profundidad y longitud del plano original, formado por abrasión al deslizar la rueda sobre el carril. Asimismo se dieron procedimientos para realizar esta estimación en presencia de ruido estructural o electromagnético inducido.

En este capítulo se aborda el proceso de medida desde el punto de vista de las aplicaciones reales. En particular, se establecen criterios para dimensionar diversos parámetros de diseño (periodo de repetición de pulsos, longitud del carril, frecuencias utilizables, etc.). Por otra parte, se propone una técnica innovadora en el ámbito de la Evaluación No Destructiva: realizar un seguimiento automático del contacto rueda-carril con el análisis simultáneo de sus desviaciones respecto al movimiento estimado del eje de la rueda en la dirección del carril.

Este último aspecto presenta diversas ventajas: No es necesario conocer la velocidad del tren, detecta automáticamente la presencia de rueda en el carril de medida sin necesidad de sistemas auxiliares, reduce la probabilidad de error por ruido estructural o inducido y, simultáneamente, reduce el tráfico de datos entre el sistema de adquisición y el computador central de evaluación.

En base a estas ideas se propone una realización basada en una única FPGA. El sistema parte de una realización anterior de un sistema de altas prestaciones para END, demostrando que el procedimiento propuesto en esta Tesis para detectar y medir planos, es realizable con pocos recursos hardware. Se ha construido un prototipo que ha sido verificado en condiciones reales de aplicación en laboratorio cuyos resultados experimentales serán descritos en el próximo capítulo.

3.1. Parámetros de diseño del sistema de medida

En la técnica de pulso-eco para la detección de planos propuesta en la Sección §2.5.2 la posición del punto de contacto rueda-carril se mide a cadencia constante, por tanto se corresponde a un sistema discreto y la frecuencia de muestreo debe verificar el criterio de Nyquist.

En el método propuesto, existen dos frecuencias de muestreo:

1. La frecuencia de muestreo f_S de la señal ultrasónica ha de ser, al menos, 2 veces la máxima frecuencia contenida en el espectro de la señal con una frecuencia central f_E y un ancho de banda fraccional b_w (definido a 6dB).
2. La frecuencia de muestreo de la posición del punto de contacto, $f_{PRF} = 1/T_{PRF}$, determina la resolución de las medidas. En coordenadas espaciales, el intervalo de muestreo es el producto $\Delta x = v T_{PRF}$.

Por un lado, la frecuencia central f_E de la señal ultrasónica debe elegirse como un compromiso entre la mayor atenuación a frecuencias elevadas y la peor resolución a frecuencias bajas. Por otra parte el periodo de repetición de pulsos T_{PRF} no puede elegirse arbitrariamente alto, ya que está limitado por la longitud del carril de medida. Finalmente, el proceso de medida requiere un determinado ancho de banda para enviar los resultados a un puesto central de visualización y evaluación.

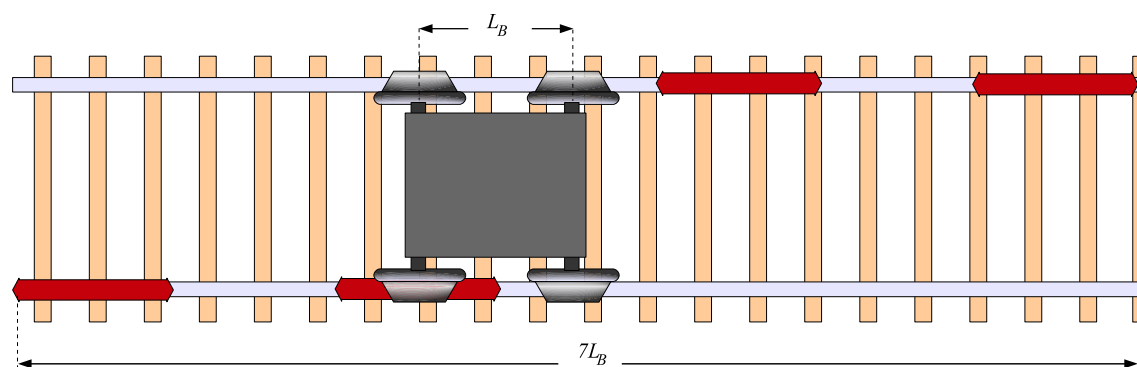
3.1.1. Longitud del carril de medida

Los criterios para seleccionar la longitud L_C del carril de medida son:

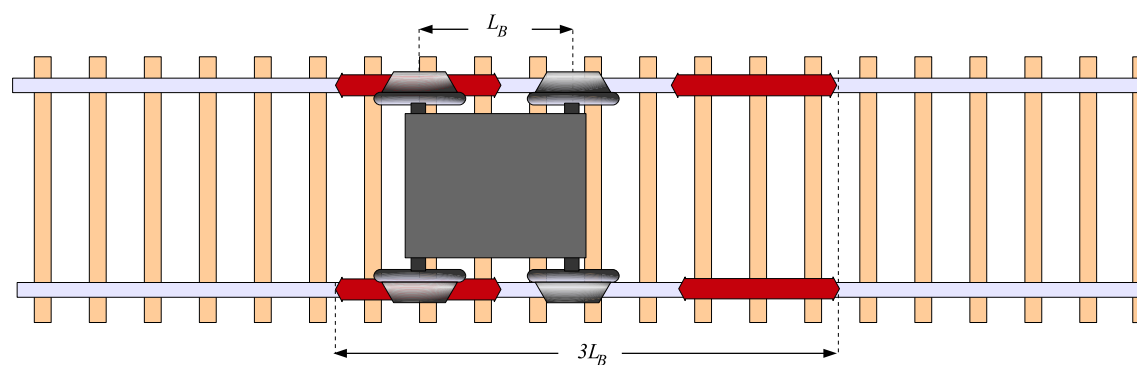
- ✧ Debe cubrir, al menos, el desarrollo completo de una rueda nueva: $L_C \geq L_R$.
- ✧ La técnica de medida no permite la presencia de dos ruedas en el carril de medida, por lo que debe ser inferior al empuje o distancia entre dos ejes de un bogie.

En Europa, la norma *UIC812 – 3*, posteriormente sustituida por la *EN13262* [Molina Sánchez, 2006], establece un radio nominal para las ruedas ferroviarias de 445mm. Por tanto el desarrollo de la rueda es $L_R \approx 2.8\text{m}$. No obstante, se fabrican ruedas ferroviarias entre 250 y 700mm de radio. Para la rueda de mayor diámetro, $L_C \approx 4.4\text{m}$.

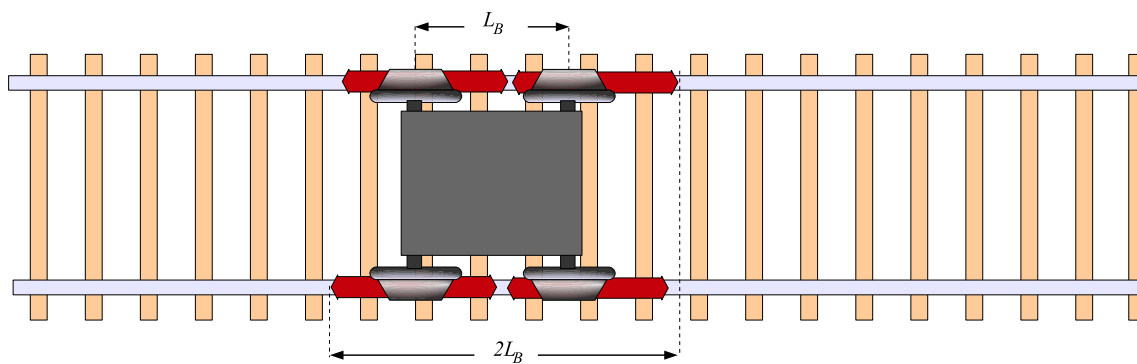
Por otra parte, la distancia de empuje L_B típica de los bogies varía entre 2 y 2.5m, según modelo y fabricante [Manabe, 2007; Tokuda y Ishige, 2008]. Por consiguiente, para evitar que existan



(a) Secciones separadas.



(b) Dos secciones separadas.



(c) Secciones juntas.

Figura 3.1: Diferentes formas de realizar la instalación.

dos ruedas simultáneamente sobre el carril de medida, su longitud debe ser inferior a la distancia de empate ($L_C \leq L_B$).

Como el desarrollo de la rueda supera la longitud admisible del carril, es necesario dividir éste en secciones, cada una de ellas con su propio transductor. Hay varias posibilidades para realizar la instalación con varias secciones. Aquí se supone que el desarrollo de la rueda es inferior a 2 veces la distancia de empate ($L_R \leq 2L_B$). Si en algún caso excepcional esto no fuera así, bastaría con incrementar los valores que resultan del análisis a continuación:

- a) **Secciones separadas:** en este caso las secciones se separan, al menos, la distancia del empate para evitar que exista más de una rueda en alguna sección (Figura 3.1a). La mayor ventaja reside en que puede utilizarse un único sistema electrónico multiplexando los disparos y señales recibidas, ya que no puede haber más de 1 rueda sobre algún carril de medida. Presenta el inconveniente de requerir una gran longitud de instalación, al menos 7 veces la distancia de empate L_B .
- b) **Dos secciones separadas:** un caso intermedio en el que se utilizan secciones separadas en paralelo a uno y otro lado de la vía (Figura 3.1b). En este caso se requieren 2 sistemas electrónicos en paralelo (uno para cada lado de la vía), multiplexando cada uno sus propias secciones. El tamaño requerido para la instalación se reduce significativamente, a 3 veces la distancia del empate.
- c) **Secciones juntas:** las secciones se sitúan una a continuación de otra y a ambos lados de la vía (Figura 3.1c). En este caso se necesitan 4 sistemas operando en paralelo pues pueden coexistir hasta 4 ruedas en la instalación de medida, aunque sólo una en cada sección. La longitud total de la instalación es la mínima posible, 2 veces la distancia de empate, por lo que se denomina *instalación compacta*.

La instalación compacta es, probablemente, la de coste más bajo a pesar de requerir 4 sistemas electrónicos en paralelo ya que, al ocupar menos espacio, la obra civil necesaria es menor (se sustituye obra civil por electrónica). Siendo así, es posible escalar el sistema para dotar de mayor robustez a la inspección, confirmando por redundancia la detección de defectos (múltiples instalaciones compactas).

3.1.2. Periodo de repetición de pulsos T_{PRF} y errores de discretización

Las medidas del tiempo de vuelo se toman a intervalos T_{PRF} , cuyo límite inferior está determinado por la longitud del carril L_C y la velocidad de propagación c de las ondas de Rayleigh:

$$T_{PRF} \geq \frac{2 L_C}{c} \quad (3.1.1)$$

Por otra parte, la evaluación de la pérdida de material d se realiza a partir de muestras del desplazamiento s calculado por el teorema de la pérdida de radio para sistemas discretizados (ecuación 2.5.19 aquí repetida):

$$d_k = \frac{\nu T_{PRF}}{R} \sum_{i=1}^M s_i(\varphi) = \frac{1}{2} \frac{\nu T_{PRF}}{R} \sum_{i=1}^M |s_i(\varphi)|$$

donde las M muestras deben cubrir el intervalo de la irregularidad. Análogamente, en coordenadas lineales, con $\Delta x = \nu T_{PRF}$, y $\varphi \approx x/R$:

$$d_k = \frac{1}{2} \frac{\Delta x}{R} \sum_{i=1}^M |s_i(x/R)| \quad (3.1.2)$$

donde $\Delta x = \nu T_{PRF}$ representa el intervalo espacial entre muestras, que determina la resolución de las medidas, y $s_i(x/R)$ es el desplazamiento entre la proyección del centro de la rueda y el punto de contacto.

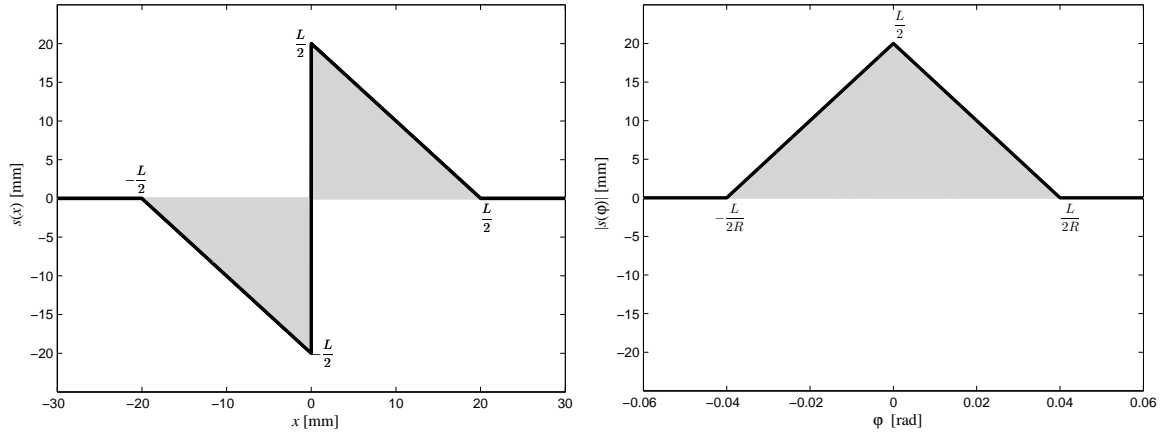
La adquisición a intervalos discretos debe verificar el criterio de Nyquist, esto es, la frecuencia de muestreo debe ser mayor o igual al doble de la frecuencia más alta contenida en la señal para que no exista pérdida de información. El caso más crítico se presenta con planos recién formados, donde $s(x/R)$ muestra una discontinuidad en $x = 0$: $s(0^-) = -L/2R$, $s(0^+) = L/2R$ (Figura 3.2a). El contenido de frecuencias de esta discontinuidad es infinito, por lo que la frecuencia de muestreo para que no exista pérdida de información debería ser también infinita. Puesto que esta condición no se cumple, se producirán errores en la estimación de d . Para tener, alguna información de la presencia de un plano, Δx no debería ser mayor que la mitad de la longitud de un plano nuevo, esto es, $\Delta x_{max} \leq L/2$.

Por otra parte, el teorema de la pérdida de radio expresa que d es igual a la mitad del área A encerrada por la función $|s(\varphi)|$ (2.3.32) que, para un plano nuevo es (Figura 3.2b):

$$d = \frac{A}{2} = \frac{L^2}{8R} \quad (3.1.3)$$

En un sistema discreto en el que se adquieren M muestras en la longitud L del plano a intervalos $\Delta x = L/M$, la estimación d_k se obtiene como:

$$d_k = \frac{1}{2R} \sum_{i=1}^M |s_i| \Delta x = \frac{L}{2RM} \sum_{i=1}^M |s_i| \quad (3.1.4)$$



(a) Representación de s en función del desplazamiento x para un plano nuevo. (b) El área encerrada por $|s(\varphi)|$ es la del triángulo isósceles mostrado.

Figura 3.2: Representación de $s(x)$ y $|s(\varphi)|$ para un plano recién formado de $L = 40\text{mm}$ en una rueda de $R = 500\text{mm}$.

Consideraremos dos casos en los que el cociente $L/\Delta x = M$ es un valor entero. Para M par, se adquieren $n = M/2$ muestras a cada lado de $x = 0$. La Figura 3.3 muestra un ejemplo con $M = 8$, $n = M/2 = 4$ y una fase de muestreo arbitraria a , $0 \leq a \leq \Delta x$.

La pendiente de $|s(x)|$ es $+1$ para $x < 0$ y -1 para $x > 0$, de modo que el valor de las muestras es $|s(x_i)| = L/2 - |x_i|$, para $-L/2 \leq x_i \leq L/2$ y $|s(x_i)| = 0$ para $|x_i| > L/2$.

$$\begin{aligned} |s_i|_{x \leq 0} &= L/2 - a - (i-1)\Delta x & 1 \leq i \leq n, \quad x \leq 0 \\ |s_i|_{x > 0} &= L/2 + a - i\Delta x & 1 \leq i \leq n, \quad x > 0 \end{aligned} \quad (3.1.5)$$

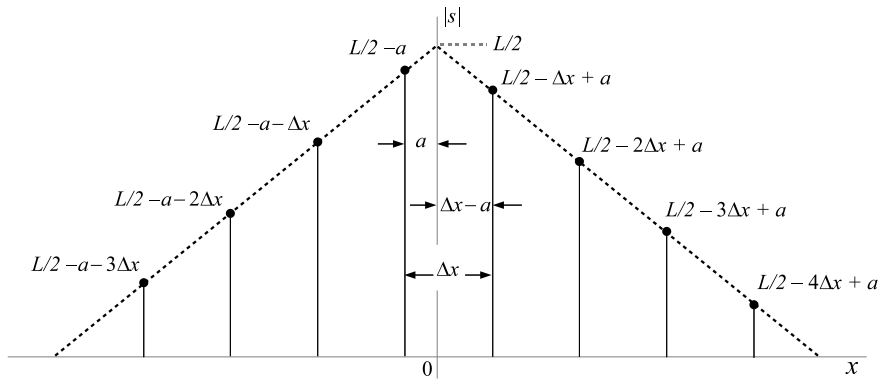


Figura 3.3: Ejemplo de adquisición de $|s|$ con $M = 8$ y $\Delta x = L/M$.

Estas dos secuencias representan las muestras adquiridas a la izquierda y a la derecha de $x = 0$. Se trata de simples progresiones aritméticas cuya suma es:

$$\begin{aligned} S \Big|_{x \leq 0} &= \frac{L - 2a - (n-1)\Delta x}{2} n \\ S \Big|_{x > 0} &= \frac{L + 2a - (n+1)\Delta x}{2} n \end{aligned} \quad (3.1.6)$$

con lo que la suma de las $M = 2n$ muestras es:

$$S \Big|_{M=2n} = \sum_{i=1}^M |s_i| = S \Big|_{x \leq 0} + S \Big|_{x > 0} = (L - n\Delta x) n \quad (3.1.7)$$

independiente de a . Sustituyendo $n = M/2$, $\Delta x = L/M$:

$$\sum_{i=1}^M |s_i| = \frac{ML}{4} \quad (3.1.8)$$

Sustituyendo este resultado en (3.1.4),

$$d_k = \frac{L}{2RM} \frac{ML}{4} = \frac{L^2}{8R} = d \quad (3.1.9)$$

que indica que la estimación d_k es igual al valor verdadero d (3.1.3). Esto es, si el intervalo entre muestras es $\Delta x = L/2n$, con n entero, la medida de la pérdida de radio es exacta. Por consiguiente, haciendo $n = 1$, bastan 2 muestras tomadas a intervalos $L/2$ para obtener un valor correcto de la pérdida de radio.

Si $M = 2n + 1$ es impar, se considera que hay $n + 1$ muestras en $x \leq 0$ y n muestras en $x > 0$ (o viceversa, por simetría). La Figura 3.4 muestra un caso con $M = 7$ ($n = 3$).

Las secuencias de muestras $|s_i|$ son análogas a las antes expresadas en (3.1.5), variando únicamente el índice final de la secuencia para $x \leq 0$, que es $n + 1$ en lugar de n . Esto es:

$$\begin{aligned} |s_i|_{x \leq 0} &= L/2 - a - (i-1)\Delta x & 1 \leq i \leq n+1, \quad x \leq 0 \\ |s_i|_{x > 0} &= L/2 + a - i\Delta x & 1 \leq i \leq n, \quad x > 0 \end{aligned} \quad (3.1.10)$$

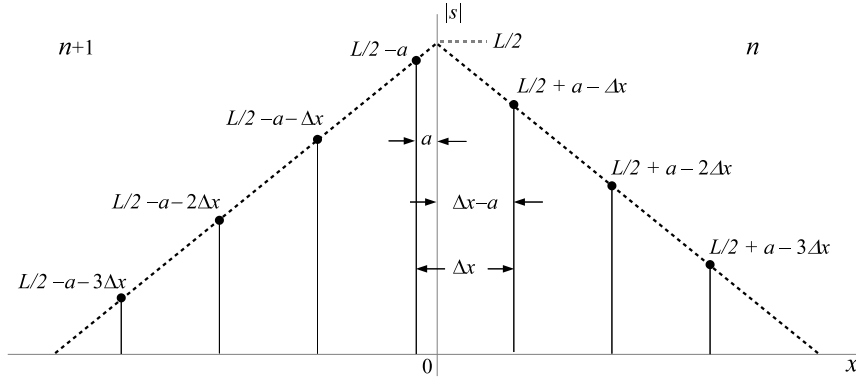


Figura 3.4: Ejemplo de adquisición de $|s|$ con $M = 7$ y $\Delta x = L/M$.

La suma de las muestras de estas secuencias es:

$$\begin{aligned} S \Big|_{x \leq 0} &= \frac{L - 2a - n\Delta x}{2} (n+1) \\ S \Big|_{x > 0} &= \frac{L + 2a - (n+1)\Delta x}{2} n \end{aligned} \quad (3.1.11)$$

con lo que la suma de las M muestras resulta:

$$S \Big|_{M=2n+1} = \sum_{i=1}^M |s_i| = S \Big|_{x \leq 0} + S \Big|_{x > 0} = Ln - n^2 \Delta x - n \Delta x + \frac{L}{2} - a \quad (3.1.12)$$

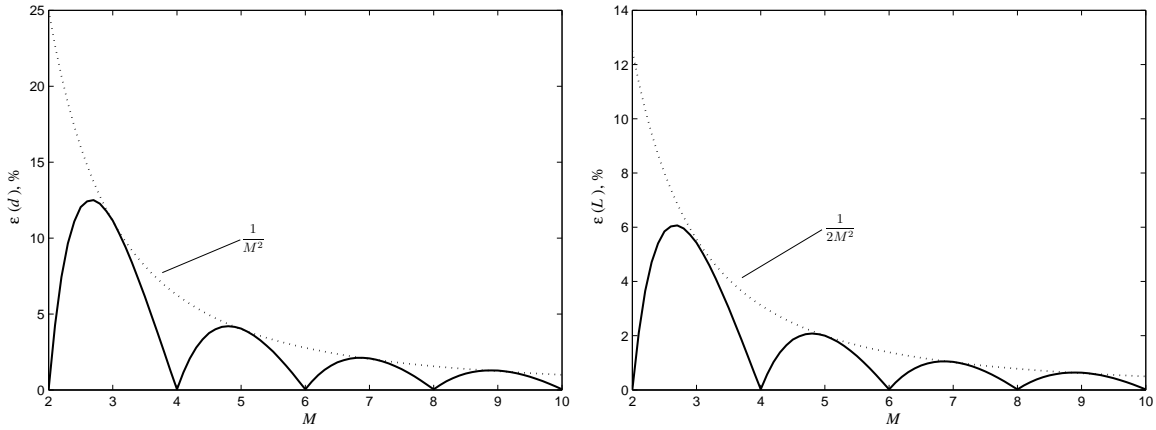
La sustitución de $n = (M-1)/2$, $\Delta x = L/M$ proporciona:

$$\sum_{i=1}^M |s_i| = \frac{LM}{4} + \frac{L}{4M} - a \quad (3.1.13)$$

En este caso el resultado no es independiente de a , variando desde un mínimo para $a = \Delta x/2$ hasta un máximo para $a = 0$:

$$\frac{LM}{4} - \frac{L}{4M} \leq \sum_{i=1}^M |s_i| \leq \frac{LM}{4} + \frac{L}{4M} \quad (3.1.14)$$

cuya sustitución en (3.1.4) proporciona:



(a) Error relativo en la estimación de d en función de M (línea continua) y función $1/M^2$ (línea de trazos). (b) Error relativo en la estimación de L en función de M (línea continua) y función $1/2M^2$ (línea de trazos).

Figura 3.5: Errores relativos en la estimaciones de d y L expresados en %.

$$\frac{L^2}{8R} - \frac{1}{8R} \left(\frac{L}{M} \right)^2 \leq d_k \leq \frac{L^2}{8R} + \frac{1}{8R} \left(\frac{L}{M} \right)^2 \quad (3.1.15)$$

El error absoluto es la diferencia de la estimación d_k con el valor real d dado por (3.1.3). El error relativo ε , en valor absoluto, es:

$$\varepsilon = \frac{|d_k - d|}{d} \leq \frac{1}{M^2} \quad (3.1.16)$$

disminuyendo cuando la cantidad de M muestras que definen la irregularidad aumenta. Para el mínimo valor $M = 3$, el error relativo es máximo, con un valor de, aproximadamente, el 11 %.

Los resultados anteriores se han obtenido para situaciones en las que el cociente $L/\Delta x = M$ es un valor entero. La Figura 3.5a muestra el máximo error relativo en la estimación de la pérdida de radio d_k en función del valor M que resulte del cociente anterior, no necesariamente entero. En la Figura 3.5b se muestra el máximo error relativo que correspondería para la estimación de la longitud equivalente del plano nuevo.

Se observa que, cuando $M = \text{par}$, el error se anula en ambos casos. Los máximos están próximos a los valores de $M = \text{impar}$, aunque no hay total coincidencia. El máximo error relativo en la estimación de la pérdida de radio resulta menor que 12.5 %, y en la longitud del plano nuevo del orden del 6.2 %, obteniéndose ambas para $M = 2.7$.

En la Figura 3.5 se representan además las funciones $1/M^2$ y $1/2M^2$ (también en %), observándose que actúan como envolventes de los errores respectivos, acotándolos (se deriva de

3.1.16). De este modo y, de forma general, puede considerarse que el máximo error en la estimación de d es inferior a $1/M^2$ y, en cualquier caso, menor que un 12.5 % para planos cuya longitud sea, al menos,

$$L_{min} = 2 \nu T_{PRF} \quad (3.1.17)$$

mientras que el error en la estimación de L es inferior a $1/2M^2$ y, en cualquier caso, menor que un 6.2 % bajo las mismas condiciones de muestreo.

Puesto que el periodo de repetición de pulsos está limitado por el tiempo de vuelo en ida y vuelta por el carril de medida (3.1.1), la evaluación de planos menores demanda reducir la velocidad de circulación. En cualquier caso, para $\nu = 3\text{m/s}$, $T_{PRF} = 1\text{ms}$, la longitud mínima de un plano nuevo, medible con el error acotado anterior, es del orden de 6mm, muy por debajo de los valores considerados críticos.

Dado que el teorema de la pérdida de radio es de aplicación general, con independencia del nivel de desgaste del plano, los resultados obtenidos para el error en la estimación de sus dimensiones equivalentes al plano nuevo pueden considerarse válidos también de forma general. Otros factores, como la presencia de ruido en las medidas, tienen también influencia en los errores, como se describe posteriormente.

3.1.3. Frecuencia de señal ultrasónica

La atenuación de una onda ultrasónica por efectos de dispersión (scattering) y absorción se describe mediante un coeficiente ϕ , expresado generalmente en dB/m. El coeficiente de atenuación no se considera una constante característica de un determinado material. La razón es que tienen gran influencia otros muchos factores, como las pérdidas por desadaptación de impedancias, mecanizado del material y proceso de fabricación [Krautkrämer y Krautkrämer, 1990]. Sin embargo, en términos relativos, si Ψ_0 es la amplitud de una onda ultrasónica plana en un determinado punto del material, la amplitud a una distancia z de dicho punto viene dada por:

$$\Psi = \Psi_0 e^{-\phi z} \quad (3.1.18)$$

donde el coeficiente de atenuación viene expresado en Nepers/m. Las unidades se cambian a dB/m dividiendo por el factor 0.1151. Los materiales metálicos ligeros (aluminio y algunas aleaciones) o aceros de grano fino, presentan coeficientes de atenuación en el orden de 1 a 3dB/m. En cambio, la fundición de hierro (grano grueso), cobre, bronce, etc. presentan valores de ϕ de hasta 300dB/m y dependen de la frecuencia. Estos materiales no son apropiados para la aplicación actual.

Por otra parte, el coeficiente de atenuación presenta una dependencia con la frecuencia, típicamente cuadrática. Para una función de la atenuación con la frecuencia del tipo:

$$\alpha = k_1 + k_2 f^m \quad (3.1.19)$$

existe una frecuencia óptima de operación dada por [Krautkrämer y Krautkrämer, 1990]:

$$f_{opt} = \frac{1}{\sqrt[m]{m k_2 z}} \quad (3.1.20)$$

Esta frecuencia es óptima desde el punto de vista de la mejor detección de un defecto esférico ideal a una distancia z : la amplitud del eco es inversamente proporcional a la cuarta potencia de la longitud de onda (directamente proporcional a la cuarta potencia de la frecuencia), mientras que la señal recibida depende exponencialmente del factor de atenuación multiplicado por la distancia.

Algunas medidas realizadas para ondas de Rayleigh en aluminio, asignan un coeficiente de atenuación $\phi \approx 4\text{dB/m}$ [Titov et al., 2006]. La variación con la frecuencia es cuadrática, pero el factor k_2 se desconoce. Además, resulta difícil realizar una correcta estimación de estos factores en el carril de medida, por la interferencia con el ruido estructural que produce máximos y valles locales no directamente relacionados con la atenuación de la señal.

Así, pues, tal y como recomiendan la mayoría de los autores, la frecuencia óptima del transductor se determina empíricamente. En particular, interesa la máxima frecuencia admisible para tener una relación señal/ruido “suficiente” a la máxima distancia de inspección. En el caso de este trabajo, se probaron transductores de 0.5, 1 y 2.25MHz, con resultados experimentales que se discuten en el próximo capítulo. El que proporcionó mejor relación señal/ruido fue el de 1MHz (a 2m de distancia). Los otros dos requirieron mayores factores de amplificación para el mismo reflector (una rueda sobre un carril de medida), confirmando el efecto de (3.1.20).

La frecuencia central del transductor f_E , con su ancho de banda fraccional b_w , determinan la frecuencia de muestreo f_S mínima. En la práctica, suele ser suficiente de 4 a 5 veces la frecuencia central. En este caso se eligió $f_S = 5\text{MHz}$ para $f_E = 1\text{MHz}$, $b_w < 100\%$.

3.1.4. Ancho de banda de los datos

La longitud del carril L_C , junto con la velocidad de propagación de la señal ultrasónica c y la frecuencia de muestreo f_S , determinan el número N de muestras que componen cada traza o *A-scan* completo:

$$N = \frac{2L_C}{c} f_S \quad (3.1.21)$$

El ancho de banda B requerido para transferir la información es:

$$B = \frac{Nb}{T_{PRF}} \quad (3.1.22)$$

donde b es el número de bits utilizado para representar cada muestra.

Con los valores típicos anteriores ($L_C = 1.4\text{m}$, $c = 3000\text{m/s}$, $T_{PRF} = 1\text{ms}$, $f_S = 5\text{MHz}$, $b \leq 16$), el número de muestras por traza es $N = 4700$ y el ancho de banda requerido para la transferencia de la información es $B = 75.2\text{Mbit/s}$. Este valor puede ser sostenido por buena parte de los estándares actuales (USB 2.0, IEEE 1394, G-Ethernet, etc.) y por otros ya anunciados, como USB 3.0. Una instalación completa, con 4 instrumentos en paralelo, generaría una tasa 4 veces superior, del orden de 300Mbit/s .

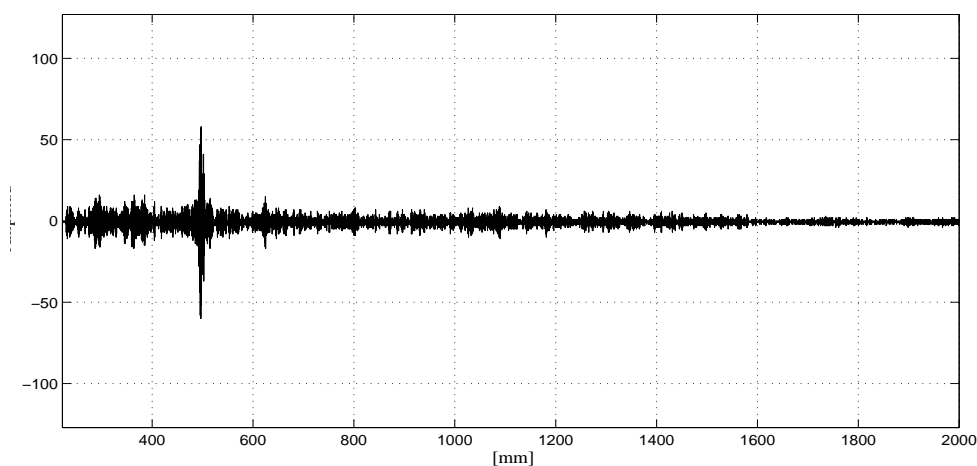
Sin embargo, la información requerida es *mucho menor*. En realidad, para cada disparo realizado, sólo se necesita conocer la *posición del punto de contacto*. Con una resolución temporal igual al periodo de muestreo, la posición se codifica con $\log_2(N)$ bits, en el caso del ejemplo anterior, con 13 bits. En tal caso, el ancho de banda requerido por cada sistema de adquisición sería de sólo 13Kbit/s para una tasa de disparos $f_{PRF} = 1\text{KHz}$. Prácticamente cualquier interfaz estándar soporta esta cadencia, incluidas RS-232, RS-485, etc.

Esta alternativa requiere que el hardware detecte la posición del eco de contacto con precisión en cualquier situación (ruido, pérdidas de señal, etc.). Al adquirir toda la señal, la primera opción facilita un post-procesamiento por software más sofisticado, dotando de mayor robustez a la detección de la posición del eco de contacto.

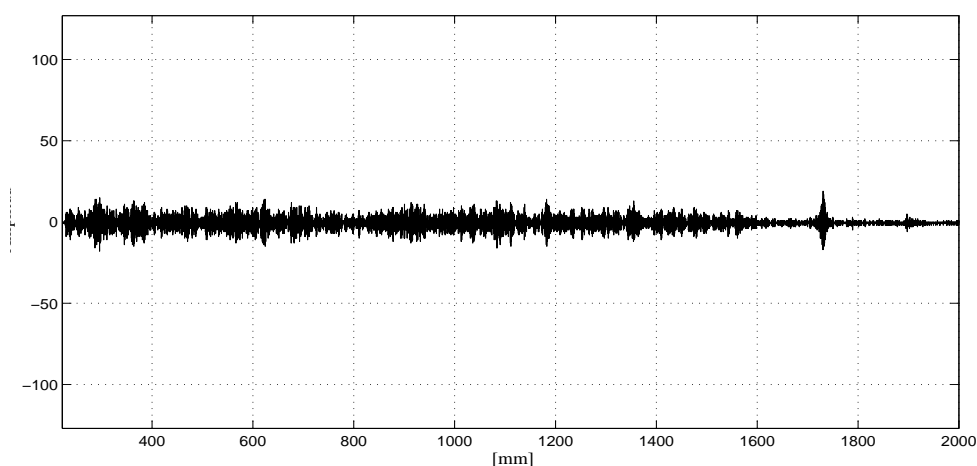
Entre ambos extremos existe una solución intermedia. Consiste en realizar un *seguimiento del eco de contacto*, enviando únicamente la traza que se encuentra en su entorno, junto con la información de posición y velocidad. Así, limitando la ventana de adquisición a un 10% de la longitud del carril, por ejemplo, el ancho de banda se reduce en un orden de magnitud, pasando a menos de 1MByte/s por sistema.

La longitud de la traza adquirida con esta técnica debe ser suficiente para realizar un post-procesamiento que afine la posición detectada. Por otra parte, al reducir la ventana de adquisición a la región ocupada por el eco de contacto, se reduce la probabilidad de obtener una posición errónea a causa de picos de ruido.

Además, puesto que la velocidad de desplazamiento puede conocerse en tiempo real y la aceleración es prácticamente nula, puede realizarse un seguimiento predictivo que permita disponer de información incluso en situaciones donde se pierda la señal de eco por interferencias con el



(a) Rueda próxima al transductor.



(b) Rueda distante del transductor.

Figura 3.6: Adquisición de la longitud del carril (Amplitud en rango de conversión $[-127, +127]$).

ruido estructural, pérdida de contacto rueda-carril, etc.

Finalmente, puesto que la medida se basa en el teorema de la pérdida de material, puede hacerse una estimación de la profundidad d del defecto a partir de la suma de todas las muestras adquiridas en la ventana de adquisición. Para ello, el tamaño de la ventana debe ser mayor o igual que la máxima longitud de un plano degenerado.

3.1.5. Seguimiento del eco de contacto

El ruido estructural producido por el carril de medida interfiere con la señal de eco. En general, el ruido estructural no es uniforme, sino que se distribuye de diferente forma en su

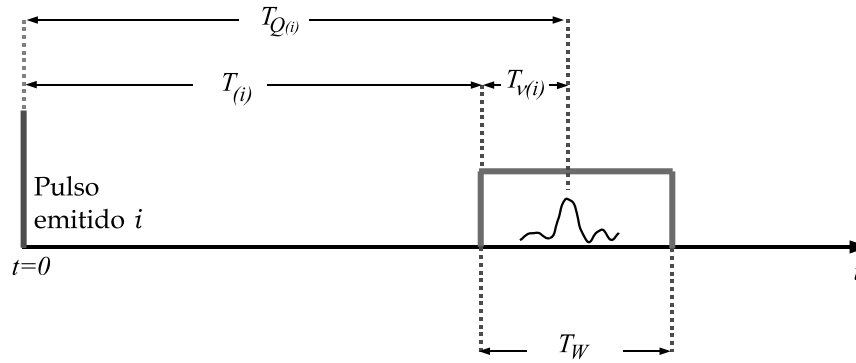


Figura 3.7: Ventana de seguimiento del eco de contacto sobre el carril de medida. Con una anchura temporal T_W se inicia un tiempo $T_{(i)}$ después del disparo i . La posición del eco de contacto es $T_{Q(i)}$.

longitud. Hay situaciones en las que la interferencia es destructiva y desaparece la señal de eco. En otros casos, el ruido estructural supera a la propia señal de eco. En estas condiciones resulta difícil estimar su posición.

La Figura 3.6a muestra una traza experimental obtenida con la rueda a 500mm del transductor. Se observa que el eco del punto de contacto supera perfectamente el nivel de ruido del entorno y, por consiguiente, su detección es sencilla.

La Figura 3.6b muestra la traza obtenida con la rueda a 1700mm del transductor. En este caso, aunque la amplitud del eco supera al nivel de ruido del entorno, es similar al de las zonas más próximas al transductor.

De este modo, si la posición del eco del contacto rueda-carril se detectara por la del máximo de una traza completa, habría muchas probabilidades de obtener resultados erróneos. Limitando esta detección a una ventana en el entorno del eco de contacto reduce las probabilidades de error.

La Figura 3.7 muestra esquemáticamente el principio en que se basa la técnica de seguimiento. La ventana de adquisición tiene una anchura fija T_W y comienza transcurrido un tiempo $T_{(i)}$ tras el disparo i . El tiempo absoluto de vuelo en ida y vuelta a la posición del eco de contacto en esta adquisición es $T_{Q(i)}$ y la posición del eco, relativa al origen de la ventana, es $T_{v(i)}$.

El seguimiento del eco de contacto se realiza controlando el tiempo de retardo $T_{(i+1)}$ del disparo siguiente a partir de medidas realizadas en el disparo i . La diferencia entre los tiempos de vuelo al eco de dos disparos consecutivos es:

$$\Delta T_{Q(i)} = T_{Q(i)} - T_{Q(i-1)} = (T_{(i)} + T_{v(i)}) - (T_{(i-1)} + T_{v(i-1)}) \quad (3.1.23)$$

La diferencia temporal $\Delta T_{Q(i)}$ es proporcional al desplazamiento del eco de contacto entre dos

disparos consecutivos, separados por el periodo de repetición de pulsos T_{PRF} . El desplazamiento del punto de contacto Q en este intervalo es $\Delta x_{Q(i)} = v_{Q(i)} T_{PRF}$, de modo que:

$$\Delta T_{Q(i)} = \frac{2v_{Q(i)} T_{PRF}}{c} \quad (3.1.24)$$

donde el factor 2 tiene en cuenta el recorrido en ida y vuelta del pulso ultrasónico. Definiendo la constante de proporcionalidad κ como:

$$\kappa = \frac{c}{2T_{PRF}} \quad (3.1.25)$$

resulta

$$v_{Q(i)} = \kappa \Delta T_{Q(i)} \quad (3.1.26)$$

De este modo se obtiene la velocidad instantánea del punto de contacto rueda-carril, tras el disparo i . Sin embargo, debido a la presencia de ruido estructural, la estimación de la velocidad tras cada disparo puede ser errónea. Considerando que el tren se desplaza a una velocidad v prácticamente constante y que la del punto de contacto sólo puede mostrar pequeñas variaciones alrededor de este valor, para realizar un seguimiento del eco de contacto es preferible filtrar los valores instantáneos $v_{Q(i)}$ para obtener medidas más estables.

Para ello se puede utilizar una media móvil de los valores obtenidos en las últimas n adquisiciones como:

$$v_{Q(i)} = \frac{\kappa}{n} \sum_{j=i-n+1}^i \Delta T_{Q(j)} \quad (3.1.27)$$

o, alternatively, una realización de un filtro IIR como el promedio de dos velocidades consecutivas:

$$v_{Q(i)} = \frac{v_{Q(i-1)} + \kappa \Delta T_{Q(i)}}{2} = \kappa \frac{\Delta T_{Q(i-1)} + \Delta T_{Q(i)}}{2} = \kappa \Delta T_{Q_m(i)} \quad (3.1.28)$$

donde $\Delta T_{Q_m(i)}$ representa el promedio entre las diferencias en los tiempos de vuelo de las dos últimas adquisiciones. En lo que sigue, se considera esta última opción.

El retardo $T_{(i+1)}$ para el disparo siguiente debería ser igual al retardo actual $T_{(i)}$ más el tiempo empleado por el ultrasonido en cubrir (en ida y vuelta) la distancia recorrida por la rueda en un intervalo T_{PRF} . Esto es:

$$T_{(i+1)} = T_{(i)} + \frac{2\nu_{Q(i)} T_{PRF}}{c} = T_{(i)} + \frac{\nu_{Q(i)}}{\kappa} = T_{(i)} + \Delta T_{Q_m(i)} \quad (3.1.29)$$

El valor resultante no considera la posible desviación del eco de contacto respecto al centro de la ventana de adquisición. Para intentar centrarlo, se añade un intervalo temporal proporcional a la desviación de la posición relativa del eco de contacto $T_{v(i)}$ respecto al centro de la ventana. Denominando $T_{E(i)}$ a esta desviación,

$$T_{E(i)} = \frac{T_W}{2} - T_{v(i)} \quad (3.1.30)$$

con lo que el retardo para el disparo siguiente queda como:

$$T_{(i+1)} = T_{(i)} + \Delta T_{Q_m(i)} - \gamma T_{E(i)} \quad (3.1.31)$$

donde $0 \leq \gamma \leq 1$ es un factor de ajuste de la sensibilidad a las desviaciones del eco respecto al centro de la ventana de adquisición. Con:

$$\Delta T_{(i)} = \Delta T_{Q_m(i)} - \gamma T_{E(i)} \quad (3.1.32)$$

el algoritmo de seguimiento calcula, para el disparo $i + 1$, el retardo:

$$T_{(i+1)} = T_{(i)} + \Delta T_{(i)} \quad (3.1.33)$$

donde el valor $\Delta T_{(i)}$ representa el incremento en el retardo entre disparos consecutivos y puede ser positivo o negativo, según sea el sentido de avance de la rueda, alejándose o acercándose al transductor, respectivamente. Ocasionalmente $\Delta T_{(i)}$ puede cambiar de signo respecto al esperado, por la función de centrado del eco de contacto en la ventana de adquisición.

El algoritmo de seguimiento puede ser sintetizado fácilmente en dispositivos FPGAs, como se expone posteriormente. Para una operación robusta es necesario disponer de una indicación de eco claramente diferenciada del nivel de ruido, de forma que pueda determinarse su posición con un detector de pico, como se expone en la sección §3.1.7.

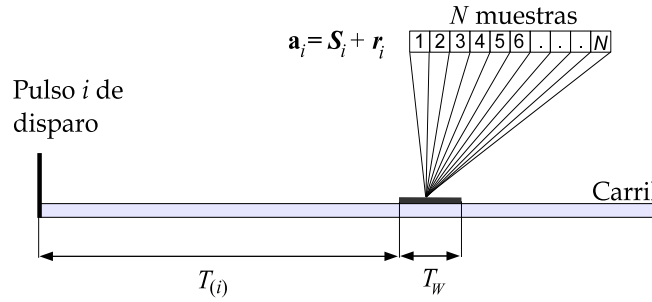


Figura 3.8: Adquisición de trazas con tiempo de retardo fijo.

3.1.6. Cancelación de ruido estructural

El ruido estructural interfiere con la señal de eco del contacto rueda-carril, modulando la posición del máximo. Para cada ventana de adquisición el contenido de ruido estructural es diferente, lo que produce variaciones aleatorias que pueden llegar a provocar una pérdida del seguimiento (ver Figuras 2.23e y 2.23f en el capítulo anterior). En efecto, al ser un sistema realimentado, las variaciones de posición respecto al centro de la ventana pueden convertirlo en inestable.

Por esta razón es importante incorporar al sistema de medida técnicas de procesamiento para reducir en lo posible los efectos del ruido estructural. Afortunadamente el soporte de medida es fijo (carril y transductor), por lo que el ruido estructural es casi estático. Las diferencias se deben a la presión ejercida por la rueda a su paso, que modifican las características resonantes y la estructura de grano del carril.

Rueda estática

Si la rueda permanece estática sobre el carril de medición, la captura del eco se efectúa con el tiempo de retardo $T_{(i)}$ fijo. La cantidad N de muestras que tiene una traza \mathbf{a}_i adquirida durante el tiempo T_W a frecuencia f_S es:

$$N = f_S T_W \quad (3.1.34)$$

El contenido de ruido estructural de una adquisición \mathbf{a}_i , correspondiente a un pulso de disparo i , es similar respecto al de la captura anterior \mathbf{a}_{i-1} . La Figura 3.8 muestra las condiciones de captura para una señal \mathbf{a}_i mientras la rueda permanece estática.

En general, se observa que el ruido estructural es prácticamente invariante para las i adquisiciones tomadas con tiempo de retardo fijo. Por tanto, es posible cancelar el ruido estructural mediante una traza diferencial; cada señal adquirida puede expresarse como:

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_{i-1} &= \mathbf{S}_{i-1} + \mathbf{r}_{i-1} \\ \mathbf{a}_i &= \mathbf{S}_i + \mathbf{r}_i \end{aligned} \quad (3.1.35)$$

donde \mathbf{S} representa la señal y \mathbf{r} el ruido estructural del carril en la zona de adquisición. La diferencia entre ambas adquisiciones se obtiene como:

$$\mathbf{d}_i = \mathbf{a}_i - \mathbf{a}_{i-1} = (\mathbf{S}_i + \mathbf{r}_i) - (\mathbf{S}_{i-1} + \mathbf{r}_{i-1}) \approx \mathbf{S}_i - \mathbf{S}_{i-1} \quad (3.1.36)$$

La expresión (3.1.36), corresponde a la diferencia entre señales que pertenecen a idénticas regiones del carril, por tanto las componentes invariantes en el tiempo pueden ser canceladas. Si la rueda permanece estática sobre el carril, la traza diferencial resultante tendrá valores próximos a cero, ya que la información cambiante en el tiempo se conserva (ejemplo: ruido eléctrico).

Rueda en movimiento

El movimiento de la rueda sobre el carril pone en ejecución el algoritmo de seguimiento, haciendo que la ventana de adquisición se desplace en el tiempo luego de cada disparo y (3.1.36) deja de ser válida.

Los tiempos de retardos entre disparos consecutivos, difieren en una cantidad $\Delta T_{(i)}$ de acuerdo con (3.1.33). Por tanto, según la dirección del movimiento de la rueda respecto al transductor, el incremento puede resultar:

- Positivo,** la señal capturada \mathbf{a}_i está retrasada con respecto a la captura anterior \mathbf{a}_{i-1} . El valor positivo de $\Delta T_{(i)}$ significa que la rueda, entre los disparos i e $i - 1$, se aleja de la fuente de emisión de pulsos.
- Negativo,** la adquisición actual \mathbf{a}_i , precede a la captura anterior. En este caso, el signo negativo de $\Delta T_{(i)}$ indica que la rueda se aproxima al transductor.

Teniendo en cuenta que la resolución del sistema está dado en periodos del reloj de muestreo, el incremento $\Delta T_{(i)}$ se corresponde con número entero w de muestras:

$$w = f_S \Delta T_{(i)} \quad (3.1.37)$$

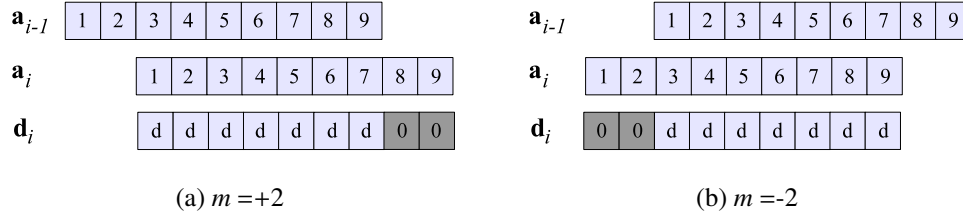


Figura 3.9: Alineación de las trazas con $N = 9$ muestras. En ambos casos la traza diferencial tiene $N - w$ valores distintos de cero, obtenidos mediante $\mathbf{d}_{i[k]} = |\mathbf{a}_{i[k]}| - |\mathbf{a}_{i-1[k+w]}|$.

La Figura 3.9 ilustra las posibles situaciones que se pueden obtener como resultado de modificar el tiempo de retardo en un incremento de w muestras, según el movimiento de la rueda. Por lo tanto la traza diferencial expresada en (3.1.36), debe ser aplicada a aquellas muestras que se corresponden con el mismo punto espacial en ambas adquisiciones.

Para asegurar que el máximo valor en la traza diferencial se corresponde con la posición actual del eco de contacto, (3.1.36) puede ser mejorada si se toma el valor absoluto de cada adquisición. De esta manera se garantiza que la posición actual de la rueda sea una indicación positiva, mientras la precedente, que también estará en la traza diferencial, tendrá valor negativo.

Considerando la alineación de vectores para un incremento positivo, como indica la Figura 3.9a, la primer muestra de la traza diferencial se obtiene como:

$$\mathbf{d}_{i[1]} = |\mathbf{a}_{i[1]}| - |\mathbf{a}_{i-1[w+1]}| \quad (3.1.38)$$

A las últimas w muestras en la traza diferencial se les asigna el valor cero, ya que no existe correspondencia entre las trazas \mathbf{a}_i y \mathbf{a}_{i-1} .

Si el incremento es negativo, las adquisiciones se alinean según lo indica la Figura 3.9b. Las primeras w muestras de la captura actual \mathbf{a}_i , no tienen correspondencia en la adquisición previa \mathbf{a}_{i-1} ; por tanto las primeras w muestras de la traza diferencial tienen asignadas un valor nulo. La muestra $w + 1$ de la captura \mathbf{a}_i sí tiene correspondencia en la muestra 1 de la adquisición previa \mathbf{a}_{i-1} , por consiguiente la muestra $w + 1$ de la traza diferencial se obtiene como:

$$\mathbf{d}_{i[w+1]} = |\mathbf{a}_{i[w+1]}| - |\mathbf{a}_{i-1[1]}| \quad (3.1.39)$$

En general, la traza diferencial puede ser encontrada utilizando el siguiente algoritmo:

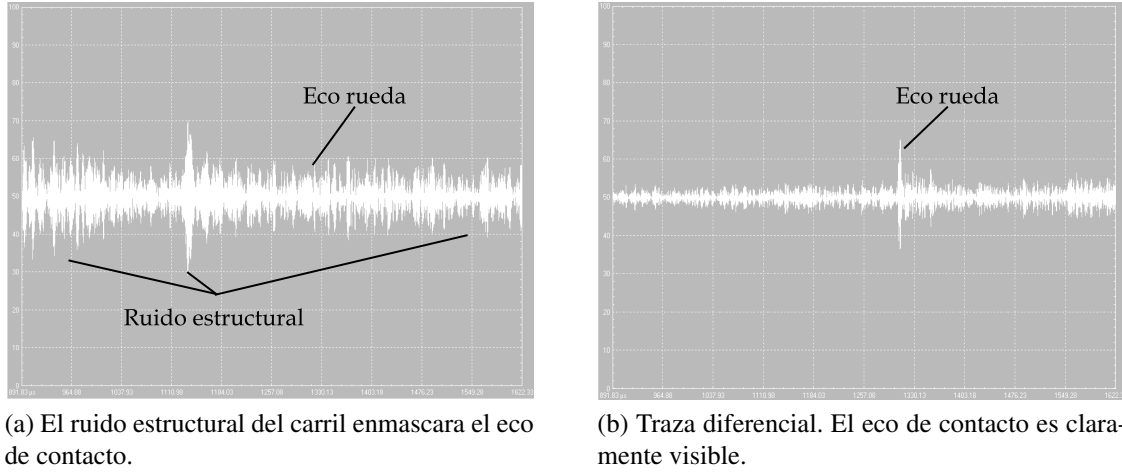


Figura 3.10: Cancelación de ruido estructural.

$$N = f_s T_w$$

$$w = f_s (\Delta T_{Q_m(i)} - \gamma T_{E(i)})$$

$$\text{If } w > 0,$$

$$\begin{aligned} \mathbf{d}_i[k] &= |\mathbf{a}_i[k]| - |\mathbf{a}_{i-1}[k+w]| & 1 \leq k \leq N-w \\ \mathbf{d}_i[k] &= 0 & k > N-w \end{aligned} \quad (3.1.40)$$

else,

$$\begin{aligned} \mathbf{d}_i[k] &= |\mathbf{a}_i[k]| - |\mathbf{a}_{i-1}[k+w]| & w < k \leq N \\ \mathbf{d}_i[k] &= 0 & 1 \leq k \leq w \end{aligned}$$

donde $k = 1, \dots, N$ representa el índice de la muestra correspondiente a la adquisición i .

El algoritmo de cancelación de ruido estructural propuesto en (3.1.40), está basado en la diferencia de los valores absolutos entre dos adquisiciones consecutivas. De esta forma, si la rueda está estática sobre el carril la diferencia será nula, salvo el ruido eléctrico. Si la rueda está en movimiento, el vector de diferencias contendrá una indicación de amplitud positiva correspondiente a la posición actual y otra de signo negativo para la precedente. Esta técnica explota el hecho de que la pieza sometida a ensayo se encuentra en movimiento. El resultado de aplicar el método de cancelación (3.1.40) se muestra en la Figura 3.10b, la rueda está en movimiento sobre una zona próxima a la posición indicada en la Figura 3.10a.

3.1.7. Detección del eco de contacto

La detección de la posición del eco de contacto se realiza, a partir de la traza diferencial, mediante un detector de pico. El algoritmo, para cada muestra k en la ventana de adquisición i de N muestras, busca la amplitud máxima $A_{m(i)}$ y su posición mediante:

$$A_{m(i)} = \max_{k=p}^q \{\mathbf{d}_i[k]\} \quad (3.1.41)$$

$$P_{m(i)} = \text{index}_{k=p}^q \{\mathbf{d}_i[k]\} \quad (3.1.42)$$

donde p y q representan índices de búsqueda dentro de la ventana de adquisición y la función $\text{index}(\cdot)$ devuelve el índice a la muestra en que se sitúa el argumento. Operando con valores absolutos de la señal diferencial, su implementación es sencilla:

- ① Iniciar $A_m = \mathbf{d}_{[p]}$; $P_m = p$
- ② Para cada muestra k tal que $p < k \leq q$,
Si $(\mathbf{d}_{[p]} > A_m)$, entonces $A_m = \mathbf{d}_{[k]}$, $P_m = k$.

Es un proceso que puede realizarse concurrentemente con la adquisición de señal y, al terminar, devuelve en $A_{m(i)}$ y $P_{m(i)}$ la amplitud y posición, respectivamente, del máximo de la señal en el intervalo $[p, q]$.

El algoritmo de seguimiento utiliza, únicamente, el valor devuelto en $P_{m(i)}$ para evaluar el retardo de la adquisición siguiente. Pero puede suceder que el nivel de la señal sea insuficiente (por ejemplo, por una pérdida de contacto rueda-carril o interferencias con ruido estructural). Para estas situaciones se dispone un umbral programable A_U que determina la validez de la posición detectada.

Si al finalizar la adquisición es $A_{m(i)} > A_U$ se valida el valor de la posición registrado en $P_{m(i)}$. En otro caso y, a falta de otra información, se pone $P_{m(i)} = N/2$, esto es, se supone que el eco ha sido registrado en el centro de la ventana. Con esto, $T_{E(i)} = 0$. Además, no se actualiza el valor de la velocidad de desplazamiento $v_{Q(i)}$ dada por (3.1.28), manteniendo el valor estimado en el disparo anterior.

De este modo se pretende mantener el seguimiento del eco de contacto aún cuando la señal sea insuficiente para determinar la posición y velocidad instantánea. Normalmente en los disparos siguientes se obtendrá un mayor nivel de señal que permitirá realizar de nuevo el seguimiento del eco en base a las medidas de tiempo de vuelo y posición dentro de la ventana.

3.2. Discusión y conclusiones

En este capítulo se establecieron los criterios de diseño y las consideraciones prácticas necesarias para implementar el sistema de medición en forma real. Con el fin de obtener una instalación compacta se propuso una vía instrumentada dividida en dos secciones, dispuestas una a continuación de otra. El planteamiento permite cubrir el desarrollo de toda la banda de rodadura y evita la presencia simultánea de dos ruedas sobre un mismo carril de medición.

Aunque sean necesarios 4 sistemas de ultrasonidos independientes operando en paralelo, la vía de inspección, en contrapartida, ofrece la ventaja de poder verificar en un mínimo espacio (2 veces la distancia de empate) las ruedas montadas en bogies y además reducir los costes de la obra civil de la instalación.

La frecuencia central de emisión, se debe elegir buscando la mejor relación señal-ruido posible a la máxima distancia de inspección, mientras la frecuencia de muestreo a utilizar debe ser 4 a 5 veces superior a la de emisión. Por otra parte, la frecuencia de repetición de pulsos se determina en función de la longitud del carril de medición y de la velocidad de propagación de las ondas ultrasónicas.

La cantidad de muestras que se adquieren de una irregularidad influye en el error con el que se puede estimar la pérdida de radio. El tamaño de la ventana de integración debe contener el intervalo de la irregularidad con al menos M muestras, siendo el mínimo $M = 2$. El error relativo cometido en las estimaciones de d decrece con valores mayores de M siguiendo la función $1/M^2$. En condiciones ideales (libre de interferencias) el sistema de medida con $M = 2.7$ muestras alcanza un error relativo máximo del 12.5 % en la estimación de la pérdida de radio.

Otro de los aspectos importantes que plantea el diseño propuesto, es la posibilidad de realizar un seguimiento automático del eco de contacto rueda-carril. Esta característica ofrece la ventaja de reducir la traza capturada y conservar sólo el entorno del eco de contacto. Este método tiene las ventajas adicionales de disminuir el ancho de banda de los datos transferidos al computador central y optimizar la capacidad de almacenamiento de datos.

Sin embargo, para garantizar un seguimiento fiable del punto de contacto, es necesario aplicar alguna técnica de procesamiento para cancelar las interferencias del ruido estructural con el eco de contacto. El algoritmo de cancelación propuesto aprovecha el movimiento de la rueda, y crea una traza formada por la diferencia de los valores absolutos entre dos adquisiciones consecutivas (traza diferencial). Por tanto cuando la rueda está en movimiento la indicación de amplitud positiva en la traza diferencial corresponderá a la posición actual del punto de contacto, y si está estática la traza resultante tendrá valores próximos a cero.

Sobre la traza diferencial se identifica el máximo valor y se compara con un umbral programado para validar la medida de posición. Este procedimiento también ayuda a detectar la presencia de una rueda a inspeccionar o conocer si hubo una pérdida de contacto rueda-carril mientras el

seguimiento está en marcha. Cuando el nivel de la señal supera el umbral de detección la posición del máximo se valida y se utiliza como dato de entrada para el algoritmo de seguimiento; en el caso que sea insuficiente se conserva el valor de la velocidad de desplazamiento estimado en el disparo anterior.

Los algoritmos mencionados anteriormente de seguimiento, cancelación de ruido y búsqueda de amplitud máxima, han sido descritos para ser integrados como bloques funcionales dentro alguna arquitectura hardware (FPGAs, ASICs, etc).

Mediciones, Experimentos Realizados Evaluación del Sistema

Los capítulos anteriores desarrollaron las bases teóricas de la técnica propuesta así como los procedimientos de medida desde un punto de vista general. En el presente capítulo se exponen y discuten los resultados obtenidos experimentalmente con una configuración de laboratorio utilizando los medios disponibles.

El banco experimental sufrió diversos cambios durante el proceso de investigación, adaptándose para resolver varios problemas de índole práctica. Por su parte, los transductores fueron diseñados y contruidos específicamente para generar ondas de Rayleigh a partir de discos cerámicos. Se partió de una plataforma electrónica de propósito general para ultrasonidos (UltraScope® Dasel Sistemas), diseñado por nuestro grupo, en el que se modificó la configuración de la FPGA para incorporar los algoritmos de seguimiento, detección de picos, cancelación de ruido estructural y envío de datos de la ventana de adquisición descritos anteriormente.

Los algoritmos de detección y medida de irregularidades basados en la teoría expuesta se realizaron por software para facilitar la verificación en múltiples condiciones (por ejemplo, tamaño de la ventana de integración para aplicar el teorema de la pérdida de radio).

Finalmente, se utilizaron ruedas reales de tren, vaciadas del velo y cubo (esto es, dejando sólo la llanta para reducir peso). Se practicaron diversas irregularidades en la banda de rodadura, de diferentes tamaños, midiéndose su perfil con resolución de 0.01mm. Se experimentó en múltiples condiciones y situaciones para evaluar las prestaciones de la nueva técnica de detección y medida. Las ruedas se movieron a mano, con un lógico proceso de aceleración y de frenado en el corto tramo de carril de medida disponible, por lo que los experimentos se realizaron en condiciones más desfavorables que en un caso real, donde la velocidad de circulación se puede considerar prácticamente constante.

Este capítulo resume algunos de los experimentos, discutiendo los resultados obtenidos en

relación con los previstos por la teoría. Cabe adelantar que, en todos los casos, se pudo verificar una gran concordancia con los valores de pérdida de radio y longitud del plano original.

La verificación experimental de las hipótesis de partida de esta Tesis Doctoral, además de resolver el problema de la detección y medida de planos y otras irregularidades en la superficie de rodadura de ruedas de tren, abre la puerta a nuevas aplicaciones en este mismo ámbito, como se desarrolla en las Conclusiones y Proyección futura.

4.1. Prototipo de laboratorio

El banco de pruebas experimental para validar la hipótesis de partida consta de las siguientes partes (Figura 4.1):

- ① Un par de llantas de ruedas ferroviarias. En cada rueda se ha mecanizado un defecto en la banda de rodadura para su evaluación.
- ② Un carril de medida de 3m de longitud, realizado con una barra prismática de acero.
- ③ Transductor piezoeléctrico de 1MHz diseñado para emitir y recibir ondas ultrasónicas superficiales.
- ④ El sistema de ultrasonidos basado en la tecnología *UltraScope*[®] desarrollada por nuestro grupo. Proporciona la excitación del transductor, la amplificación de los ecos (hasta 60dB), su digitalización (10bits), el procesamiento digital en una FPGA, memoria externa (1MB) y una conexión USB v2.0.
- ⑤ Amortiguador de ultrasonidos para atenuar los ecos producidos por el final del carril.
- ⑥ Ordenador (PC) para el análisis de datos, recibidos por un puerto USB v2.0 desde el sistema de adquisición.
- ⑦ Cables de conexiones.

4.2. Generación de ondas de Rayleigh

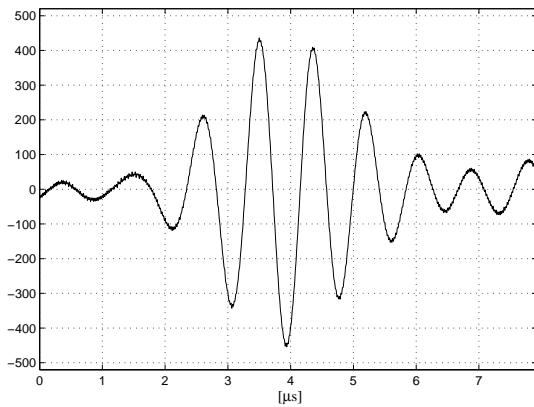
Como se expuso en la sección §1.5.3, las ondas de Rayleigh son superficiales, con una pequeña penetración en el material, del orden de una longitud de onda. Su velocidad de propagación es función de las velocidades de propagación de ondas transversales y longitudinales (Ec. 1.5.4). En acero, $c_T \approx 3.13 \cdot 10^3 \text{ m/s}$ y $c_L \approx 5.85 \cdot 10^3 \text{ m/s}$, con lo que resulta $c \approx 2.9 \cdot 10^3 \text{ m/s}$.



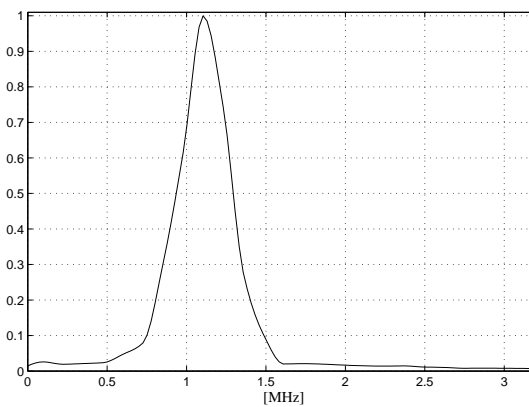
Figura 4.1: Diagrama del prototipo construido en el laboratorio.



(a) Transductor diseñado para el banco de pruebas.



(b) Respuesta temporal del transductor.



(c) Respuesta en frecuencia del pulso.

Figura 4.2: Transductor diseñado para la generación de ondas de Rayleigh y su respuesta temporal y de frecuencia aplicando la excitación indicada en Tabla 4.1.

Existen diversos métodos para generar ondas de Rayleigh, siendo los más comunes la excitación con EMATs y la conversión por refracción. En este trabajo se ha utilizado el segundo método. Según la ley de Snell, haciendo $\beta_2 = 90^\circ$ en (1.5.1) y utilizando la velocidad de propagación c se obtiene:

$$\beta_1 = \arcsin \frac{c_{L1}}{c} \quad (4.2.1)$$

donde β_1 es el ángulo de la onda incidente y c_{L1} la velocidad de propagación de las ondas longitudinales por el material de acoplo entre el transductor y el carril de medida. En esta

<i>Configuración de la excitación del transductor</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>
Tensión de excitación	-250 [V]
Número de pulsos	2
Duración de semipulso	300 [ns]

Tabla 4.1: Parámetros de excitación del transductor.

expresión debe ser $c_{L_1} \leq c$ para que no exista reflexión total. Así, como medio acoplante, podría utilizarse agua ($c_{L_1} \approx 1.5 \cdot 10^3 \text{ m/s}$) o muchos materiales plásticos en los que la velocidad de propagación es inferior a $c \approx 2.9 \cdot 10^3 \text{ m/s}$. Por ejemplo, para Rexolite® (C-Lec Plastics, Inc.) $c_{L_1} \approx 2.36 \cdot 10^3 \text{ m/s}$ y para Metacrilato $c_{L_1} \approx 2.7 \cdot 10^3 \text{ m/s}$.

Dado que la aplicación puede estar a la intemperie, no es adecuado utilizar agua como medio acoplante por las posibles pérdidas por evaporación. Así, el transductor se diseña pegando una cerámica piezoeléctrica a una cuña de plástico con un ángulo dado por (4.2.1), que son $\beta_1 = 54.5^\circ$ para Rexolite y $\beta_1 = 68.6^\circ$ para metacrilato (Figura 4.2a). La longitud de la cuña es suficiente para introducir todo el haz ultrasónico en el carril. Al mismo tiempo, la cuña se rodea de material absorbente del sonido (muy atenuante) para evitar en lo posible reflexiones internas y la generación de otros modos de propagación, con excepción de la cara que está en contacto con el carril, al que se pega con cianocrilato para asegurar y mantener estable el acoplamiento.

El acoplamiento conseguido entre transductor y carril es muy bueno (por contacto) y puede operar a la intemperie. Sin embargo, el carril tiene cierto contenido de grano que produce ruido estructural, además de otros modos de propagación simultáneos con la onda de Rayleigh. Estos modos producen reverberaciones y ecos que contaminan la señal, e influyen en la medida obtenida por el sistema (sección §2.7).

La Figura 4.2b muestra la forma de onda del eco producido por un defecto en la superficie de un bloque patrón de acero, ubicado a 15cm del transductor. La respuesta temporal se obtuvo con los parámetros de excitación indicados en la Tabla 4.1¹.

El análisis en frecuencia del pulso emisión, mostrado en la Figura 4.2c, indica que la frecuencia de la señal portadora es levemente superior a la deseada (1.1MHz) y el ancho de banda relativo es del 35 %.

La electrónica de control, permite variar en un amplio rango el tipo de excitación aplicada al transductor. Se pueden modificar los valores de amplitud, duración y número de pulsos aplicados en el disparo. Por lo general si se utiliza una excitación monopulsada, la duración del pulso debe ser aproximadamente igual a la mitad del período de oscilación para obtener la mayor cantidad de energía transferida al carril. Si se desea conseguir una mayor energía transmitida

¹Los parámetros se determinaron empíricamente.

al medio, se pueden agregar más pulsos en el disparo (excitación multipulsada). Esta situación ayuda a compensar la absorción del material, pero va en detrimento de la resolución axial del pulso ultrasónico generado. En la práctica, la duración del semipulso se puede modificar ligeramente para compensar, parcialmente, este efecto. En el caso actual, se obtuvo una mejor relación amplitud/duración del eco con una excitación de 2 pulsos con un periodo de 600ns (300ns por semi-pulso, en lugar de los 500ns teóricos para un transductor de 1MHz).

Elección de la frecuencia de emisión

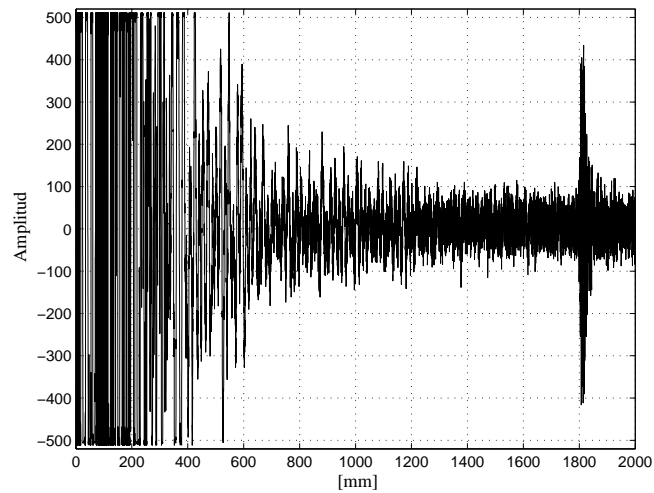
En la sección §3.1.3 se expuso que encontrar la frecuencia óptima de emisión resulta complicado, ya que se ven involucrados factores que dependen de las pérdidas por desadaptación de impedancias, mecanizado del material, proceso de fabricación e interferencia con el ruido estructural.

Siguiendo la recomendación de la mayoría de autores la frecuencia de emisión f_E se determinó empíricamente utilizando transductores comerciales PANAMETRICS modelos A413, C401, y C403, de 0.5, 1 y 2.25MHz respectivamente (Olympus).

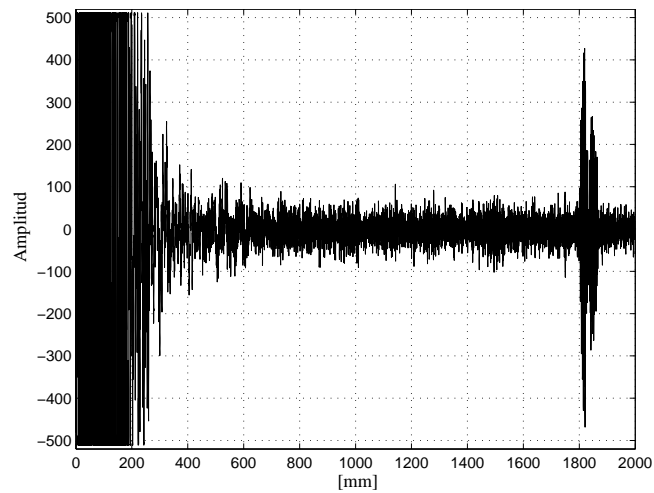
Frecuencia de emisión: 0.5MHz. La Figura 4.3a muestra una captura que visualiza 2000mm del carril de inspección. El eco de contacto rueda-carril se ubica a 1800mm del transductor. Para obtener la amplitud del eco al 80 % del rango de conversión (rango ADC: ± 511), fue necesario utilizar una ganancia de 44.8dB. Es importante tener en cuenta que la zona ciega, originada por la excitación del transductor, inutiliza casi 600mm de carril en este caso.

Frecuencia de emisión: 1MHz. El segundo ensayo se realizó con un transductor de frecuencia doble (Figura 4.3b). Como en el ensayo anterior, se capturaron 2000mm de carril de inspección, con la rueda en la misma posición. La ganancia utilizada para obtener una indicación de amplitud similar al caso anterior es menor (36.9dB) ya que al aumentar la frecuencia, el haz es más directivo, confinando una mayor proporción de energía en la superficie superior del carril de medida. Asimismo la zona ciega es mucho más corta (300mm).

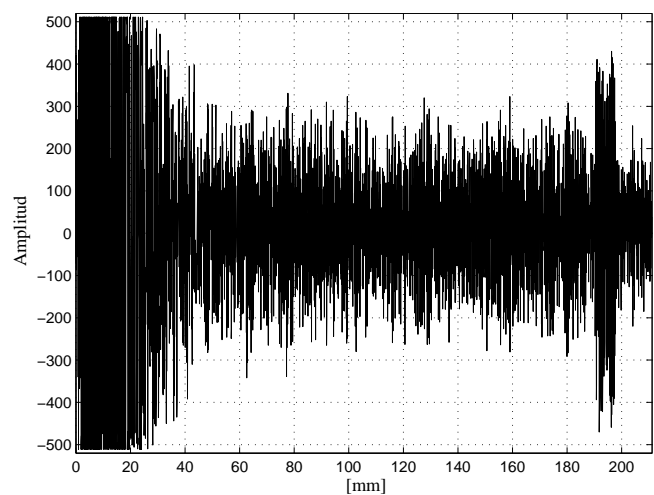
Frecuencia de emisión: 2.25MHz. Al aumentar la frecuencia de emisión (Figura 4.3c); se reduce la zona ciega (40mm), pero la atenuación es mucho mayor. Para conseguir una amplitud del eco al 80 % del rango de conversión fue necesaria una ganancia de 58.7dB. En este caso la posición de la rueda es ahora muy próxima al transductor (200mm), ya que los pulsos se atenúan pronto y resulta problemática la detección del eco del punto de contacto rueda-carril a mayores distancias. Asimismo la relación señal-ruido empeora en relación con el caso anterior.



(a) Frecuencia de emisión: 0.50MHz. Ganancia: 44.8dB.



(b) Frecuencia de emisión: 1.00MHz. Ganancia: 36.9dB.



(c) Frecuencia de emisión: 2.25MHz. Ganancia: 58.7dB.

Figura 4.3: Resultados obtenidos en los ensayos utilizando diferentes frecuencias de emisión.

Con estos resultados, el valor de frecuencia central de 1MHz resulta el más apropiado ya que se consigue una buena relación señal/ruido a la máxima distancia de inspección y una zona ciega próxima al transductor reducida.

4.2.1. Carril de medición

Inicialmente se utilizaron dos tramos de carril ferroviario, de 6m de longitud cada uno dispuestos sobre una bancada de soporte (Figura 4.4a).

Los primeros ensayos consistieron, en enviar ondas superficiales por los carriles y detectar, simplemente, el eco de la rueda. Se utilizaron dos llantas retiradas de servicio, para la evaluación del sistema por su menor peso (unos 320Kg), para una mayor facilidad de manipulación en laboratorio. Por lo tanto, la superficie de contacto rueda-carril es mucho menor que la que se produce con trenes reales.

Sobre los carriles se enviaron ondas superficiales para detectar, simplemente, el eco de la rueda. Se logró apreciar un alto nivel de ruido en la señal que enmascaraba el eco de posición de la rueda, pese a que se llevaron a cabo diferentes acciones para mejorar las condiciones de señal/ruido (pulido de superficies, reubicación de transductores para dirigir la señal superficial hacia el punto de contacto rueda-carril, etc.).

La Figura 4.4b muestra las indicaciones en radiofrecuencia obtenidas con la técnica pulso-eco y la rueda situada sobre el carril.

A pesar de las modificaciones realizadas, no fueron suficientes para mejorar la relación señal/ruido. Los bajos niveles de eco obtenidos en el banco de prueba original, motivaron el cambio de la forma geométrica del carril de inspección. Se optó como alternativa, la utilización de barras calibradas cilíndricas de acero para conseguir una mejor detección y soporte.

Las barras calibradas se montaron sobre soportes de madera; en uno de los extremos de cada barra, se mecanizó el lugar para situar el transductor.

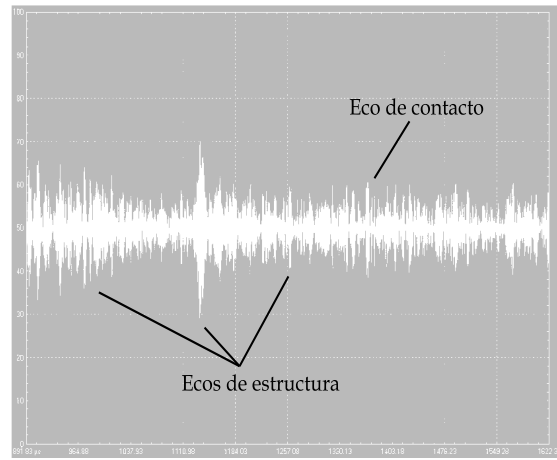
La nueva propuesta permitió reducir el ruido estructural, pero al mismo tiempo disminuyeron los ecos del contacto rueda-barra (Figura 4.4c). Esto se debe a que el contacto rueda-carril se produce sobre una generatriz de la barra calibrada en una longitud muy pequeña, presentando una muy baja reflectividad a la señal ultrasónica que hace casi imposible obtener una buena detección de ecos.

Por último se diseñó un nuevo carril, basado en una pletina prismática de acero calibrada de 8mm de espesor, 30mm de profundidad. Este nuevo carril se construyó de la siguiente manera:

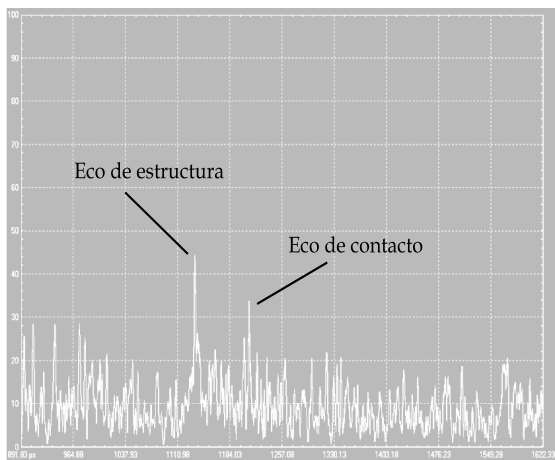
✧ Se emplearon bloques de madera para sujetar las barras calibradas.



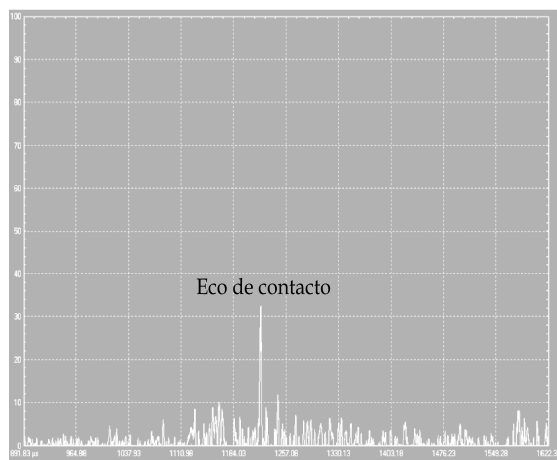
(a) Banco de prueba construido con carriles ferroviarios.



(b) Adquisición sobre carril ferroviario.



(c) Adquisición sobre barra calibrada.



(d) Adquisición sobre barra prismática.

Figura 4.4: Bancada de ensayos para laboratorio. (a) Bancada construida con carriles ferroviarios. (b) Traza adquirida sobre carril en RF. La mala calidad del acabado superficial del carril, es una de las causas del ruido. (c) Indicación en video del eco de la rueda utilizando una barra cilíndrica calibrada como carril de inspección. (d) Indicación del eco de contacto sobre el carril de pletina prismática (envolvente de la señal en modo diferencial).

- ✧ Se talló, en cada bloque de madera, una ranura de mayor tamaño que el espesor de la pletina para disponer de cierta holgura.
- ✧ En el fondo de la ranura, se dispuso una barra de acero cilíndrica sobre la que se apoya la pletina.
- ✧ La pletina alojada en una ranura con cierta holgura y apoyada en un cilindro metálico,

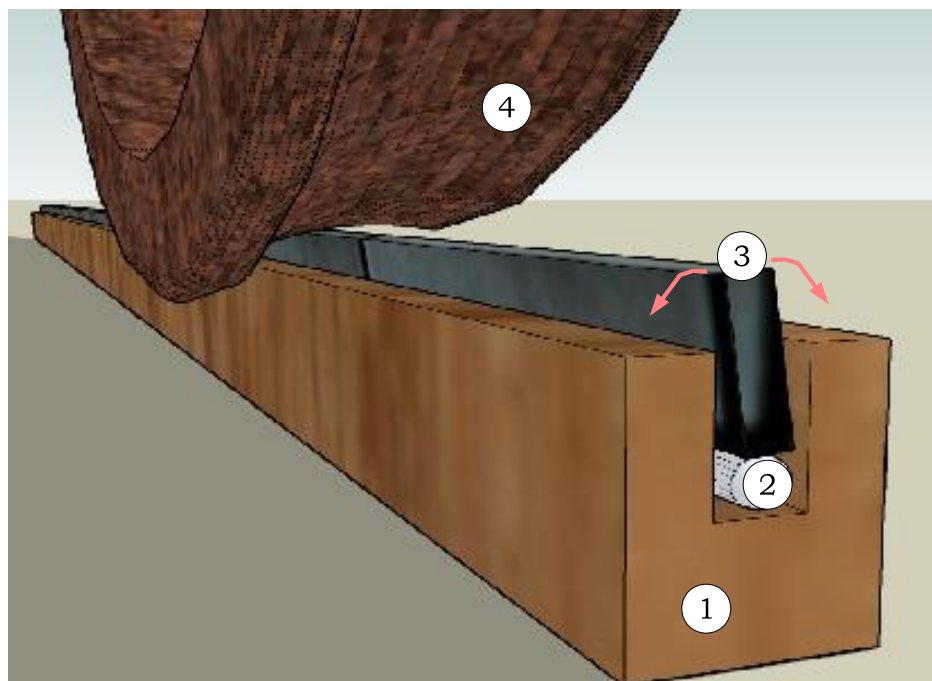


Figura 4.5: Carril de medición para laboratorio diseñado en base a una barra prismática. Referencias: ① Bloque de madera tallada. ② Apoyo para adaptar la barra a la banda de rodadura. ③ Pletina de acero. ④ Rueda.

dispone de cierto grado de libertad para adaptarse a la curvatura de la banda de rodadura.

El nuevo montaje, permite un ajuste automático del carril a la pisada de la rueda cualesquiera sea su estado de desgaste. El eco del punto de contacto (Figura 4.4d) se define mejor gracias al montaje mecánico, y se discrimina del ruido de fondo (ruido estructural), que se puede cancelar utilizando el método de trazas diferenciales propuesto en la sección §3.1.6. Un esquema del montaje mecánico con la barra prismática para el carril de medición se muestra en la Figura 4.2.1. En un extremo, se situó el transductor emisor-receptor.

La longitud del carril de medida, cubre el desarrollo completo de las ruedas de ensayo ($L_C \geq L_R$). El período de repetición entre pulsos se ajusta al tiempo en ida y vuelta de un pulso ultrasónico a lo largo del carril de 3m; de acuerdo con (3.1.1):

$$T_{PRF} = \frac{2L_C}{c} = 2\text{ms} \quad (4.2.2)$$

En condiciones reales de operación y, con el fin de obtener una *instalación compacta*, la longitud del carril debe ser menor adaptándose al empuje de los bogies (ver criterios de diseño en la sección §3.1.1).



Figura 4.6: Montaje de llantas usadas para los ensayos del sistema.

4.2.2. Ruedas

Los ensayos de laboratorio se practicaron con un juego de ruedas ferroviarias formado por un par de llantas de radio $R = 420\text{mm}$. La Figura 4.6 muestra el montaje realizado para la manipular las llantas. El peso estimado del juego de ruedas construido es de unos 320Kg, lo que limita por el momento de inercia las aceleraciones de arranque y frenado manual en el corto espacio del carril de medida.

Las llantas utilizadas fueron torneadas en su banda de rodadura tras ser retiradas del servicio, pero las pestañas presentaban algunas irregularidades:

- ✧ Leves deformaciones plásticas. La punta de la pestaña pueda haberse deformado por las presiones de contacto, causadas por el movimiento lateral del juego de ruedas en la vía, especialmente en las curvas [Thanh, 2003; Zakharov et al., 1998].
- ✧ Golpes, consecuencia de la manipulación en los traslados, y falta de cuidado durante el tiempo en que se almacenaron las ruedas una vez fuera de servicio.

En cada superficie de rodadura se mecanizaron defectos para simular planos con distinto grado de desgaste y longitud.

4.3. Mediciones de perfil

Se midió el perfil de cada llanta en las zonas mecanizadas para contrastar las indicaciones obtenidas con el sistema de inspección y los algoritmos de medición basados en el teorema de la pérdida de radio.

Si bien existen dispositivos comerciales de medición manual para el perfil de ruedas, por ejemplo el sistema *MiniProf Wheel* de [Greenwood Engineering](#), se optó por construir un instrumento que se adaptase a la geometría de la llanta (rueda vaciada).

4.3.1. Sistema de medición de perfil

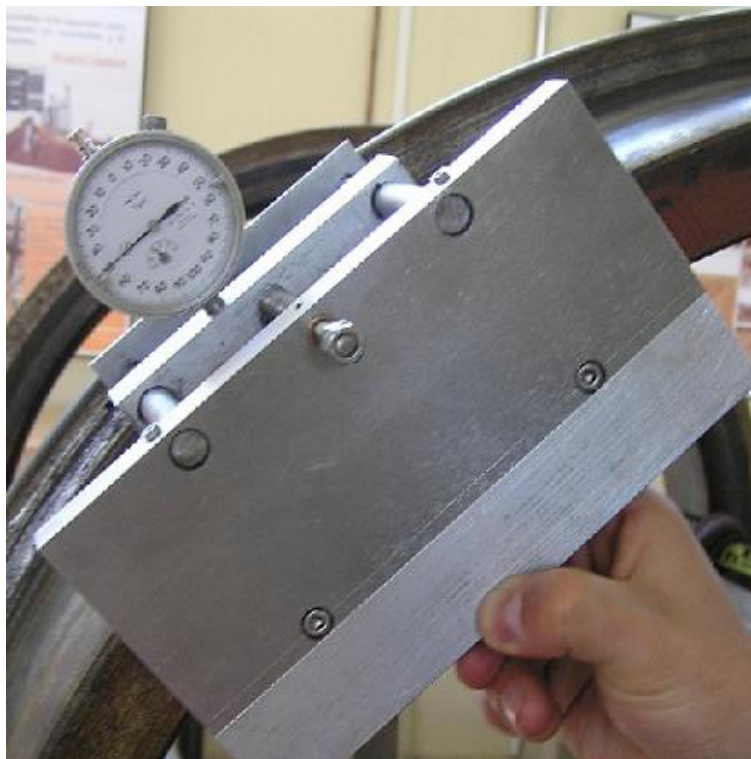
La Figura 4.7 muestra el sistema de medición manual desarrollado para obtener el perfil de los defectos mecanizados. El instrumento puede determinar la profundidad de las irregularidades con una precisión de una centésima de milímetro (0.01mm).

El diseño del instrumento estuvo condicionado por el mal estado de las pestañas, que no pudieron utilizarse como referencia y punto de apoyo, como en la mayoría de los sistemas de medición que existen en el mercado. En este caso se utilizan como referencias la superficie circular interna de la llanta (que había sido torneada para producir el vaciado de la rueda), y la cara externa lateral de la rueda. Ambas superficies se encuentran a 90° y en buen estado. Además se puede ajustar la posición del instrumento sobre cualquier punto de la sección transversal de la banda de rodadura para encontrar el perfil de las irregularidades en diferentes posiciones. Una vez establecida la profundidad a medir, se puede desplazar el instrumento por toda la circunferencia.

Todas las mediciones del perfil en las zonas mecanizadas, se tomaron sobre el punto nominal de contacto $ncp \approx 70\text{mm}$, cada 0.3° de separación ($\Delta x \approx 2\text{mm}$).

Irregularidades

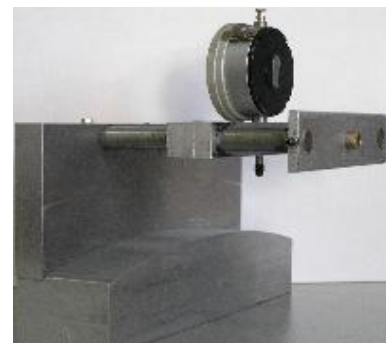
Se mecanizaron dos planos uno en cada rueda, denominando *Rueda1* a la que tiene el defecto de mayor longitud (unos 40mm) y *Rueda2* a la de menos longitud (unos 20mm). El perfil de cada defecto en coordenadas rectangulares obtenido con el instrumento de medida descrito se muestra en la Figura 4.8.



(a) Medición del perfil sobre la irregularidad.



(b) Vista de frente.



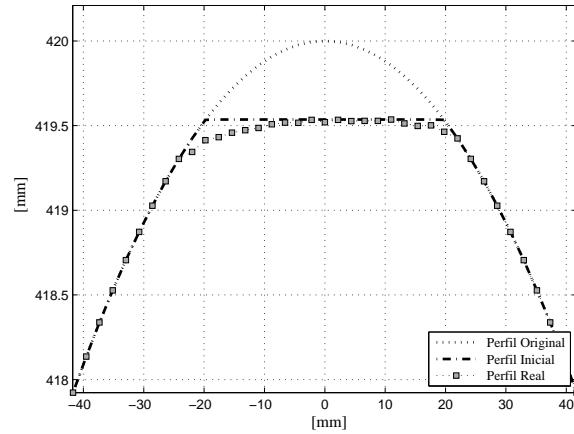
(c) Vista posterior.

Figura 4.7: Sistema para medir el perfil de la rueda, desarrollado en los laboratorios del IAI-CSIC.

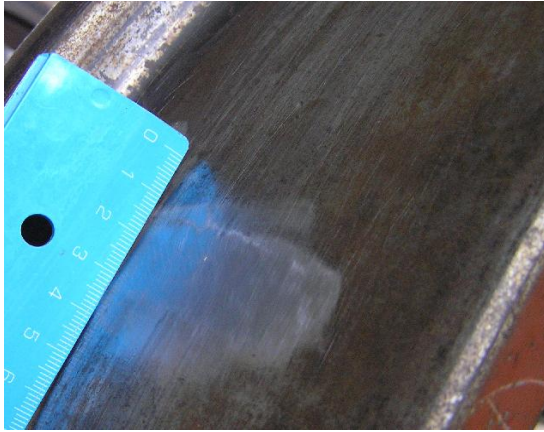
Se observa que la geometría del defecto *Rueda1* corresponde a la de un plano degenerado y no simétrico en la *Etapa III* (no hay regiones planas). Por su parte, la geometría del defecto *Rueda2* corresponde a una cavidad. Sin embargo su comportamiento en condiciones dinámicas equivale a las de una irregularidad en la *Etapa II*, con los bordes redondeados y una zona central plana. En este caso la profundidad d para reconstruir el plano inicial se obtiene del valor a los bordes de la irregularidad, mientras que, en el primero, se aplica el criterio de conservación de la máxima pérdida de radio. Los parámetros encontrados para cada defecto se muestran en la Tabla 4.2.



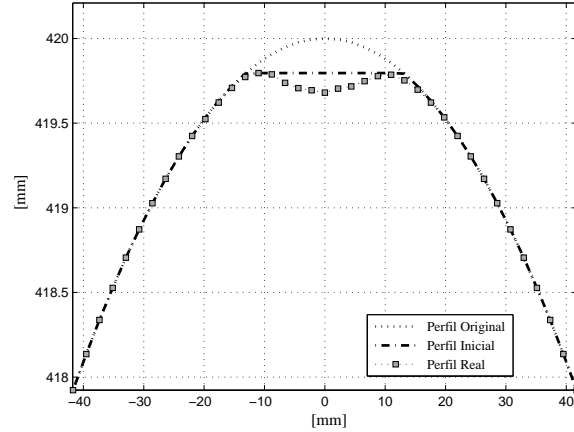
(a) Imagen del defecto en Rueda 1.



(b) Perfil medido del defecto en Rueda 1.



(c) Imagen del defecto en Rueda 2.



(d) Perfil medido del defecto en Rueda 1.

Figura 4.8: Defectos mecanizados sobre las ruedas de ensayo. Las medidas de las irregularidades se tomaron sobre la zona nominal de contacto ($\Delta\theta = 0.3^\circ$, $\Delta x \approx 2\text{mm}$, $n_{cp} = 70\text{mm}$).

Dimensiones de Defectos		
Parámetro	Rueda 1	Rueda 2
Profundidad (d)	0.46 [mm]	0.20 [mm]
Longitud Inicial (L)	39.3 [mm]	25.9 [mm]

Tabla 4.2: Profundidad medida de los defectos mecanizados y sus longitudes iniciales calculadas en función de d .

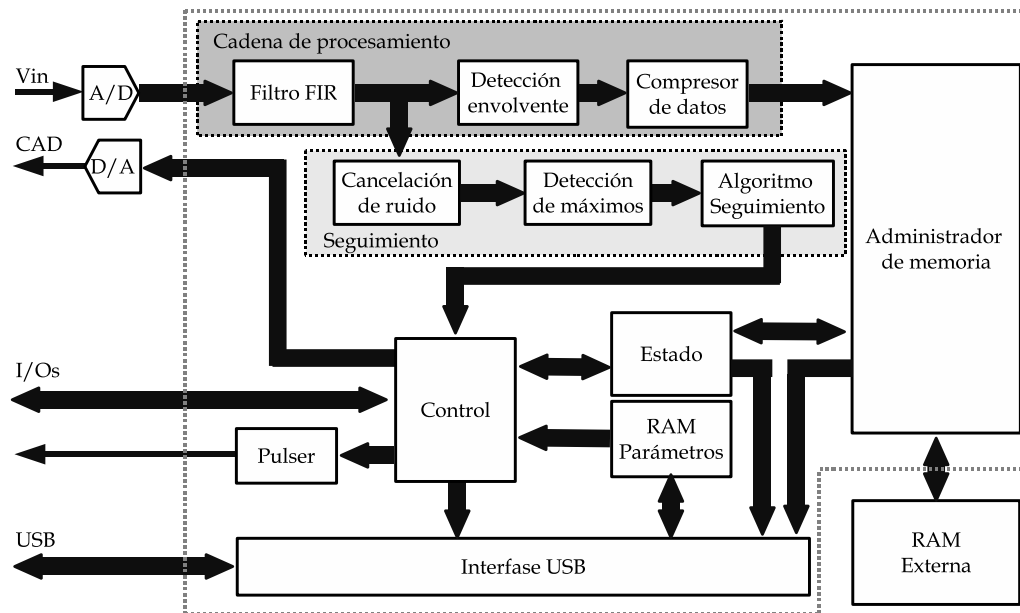


Figura 4.9: Diagrama en bloques del sistema de ultrasonidos desarrollado para el prototipo de laboratorio.

4.4. Sistema de ultrasonidos

Se aprovecharon las características de reconfiguración que tiene el sistema de ultrasonidos *UltraScope*[®] [Fritsch et al., 2006; Mateos et al., 2007], para modificar e integrar los algoritmos de seguimiento y de cancelación de ruido estructural. El diagrama en bloques de la arquitectura sintetizada se muestra en la Figura 4.9.

Las señales de eco capturadas por el sistema se envían a un ordenador de evaluación por medio del bus USB v2.0 a una tasa de transferencia de datos de 20MB/s.

A continuación se realiza una breve descripción de los bloques de funcionamiento del hardware diseñado:

Conversión A/D: los datos se adquirieren con 10 bits de resolución y a una frecuencia de muestreo programable. Se fijó a 5MHz en todos los ensayos.

Cadena de procesamiento las muestras se procesan, a la frecuencia de muestreo, con un grupo de funciones digitales: filtro programable de 32 coeficientes, etapas de extracción de envolvente y de compresión de datos, ambas utilizadas en operaciones de depuración y calibración.

Seguimiento: en este bloque se integra el algoritmo de seguimiento para determinar el tiempo de retardo necesario en cada adquisición (sección §3.1.5).

También se ha sintetizado el método de cancelación de ruido estructural, basado en la creación de un vector de datos formado por la diferencia entre los valores absolutos de dos adquisiciones consecutivas (sección §3.1.6).

Por último se incorpora el detector de picos que registra la posición y el valor del máximo de la traza diferencial mientras la adquisición está en curso.

Las tres etapas permiten realizar el seguimiento del eco de contacto con una pequeña ventana de adquisición. Los valores registrados se comparan con un umbral de validación, para determinar si existe rueda sobre el carril y poner en ejecución el algoritmo de seguimiento y adquisición de datos.

Control: este bloque gestiona las funciones necesarias para el disparo del transductor y habilita la captura de datos en la ventana de tiempo establecida por el algoritmo de seguimiento. Además atiende las entradas y salidas externas, controla en forma dinámica la ganancia del sistema (*CAD*) y verifica el estado de funcionamiento global. La instancia incorpora además una máquina de programación, que carga los registros de operación y los coeficientes del filtro desde una memoria interna antes de arrancar el sistema. A continuación el sistema opera sin intervención del ordenador de evaluación: emite pulsos, captura y procesa señales de forma repetitiva.

Otros bloques funcionales: existe un generador programable de pulsos (*pulser*) que controla, a través de un amplificador de potencia, la excitación del transductor. El bloque permite establecer el ancho del pulso de excitación en un rango comprendido entre 30-1600ns y con una resolución de 6.25ns; además puede generar ráfagas entre 1 y 16 pulsos por disparo.

El bloque gestor de memoria atiende los accesos de la interfase USB y de la cadena de procesamiento al búfer de almacenamiento externo. También genera un encabezado de identificación de trama al finalizar un ciclo de adquisición y procesamiento. El encabezado proporciona información del estado de operación del sistema, amplitud del máximo, posición, tiempo de vuelo medido del pulso, longitud de la traza de adquisición y número de trama.

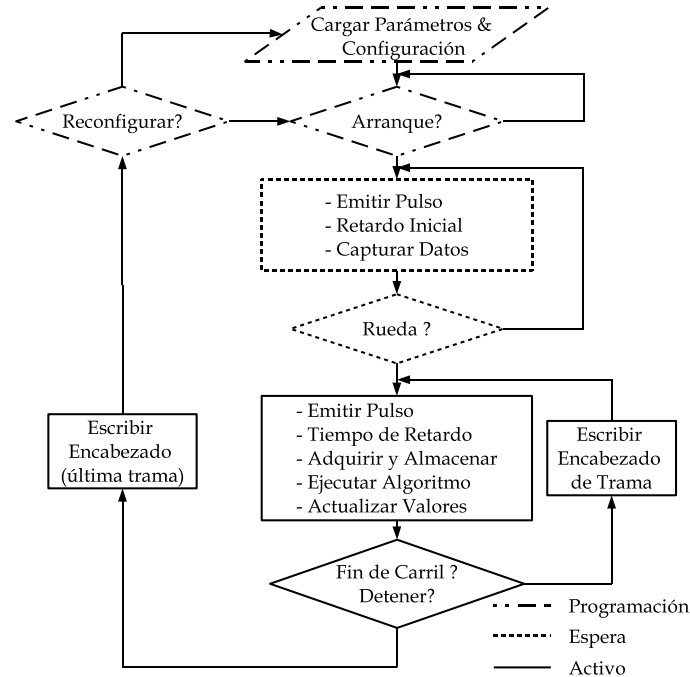


Figura 4.10: Diagrama de flujo del funcionamiento de la lógica de control del sistema de ultrasonidos.

4.4.1. Funcionamiento de la lógica de control

La Figura 4.10 contiene un diagrama de flujo que indica el comportamiento del sistema. El diseño lógico posee tres estados de operación:

Programación: estado donde se espera la intervención del ordenador de control para la carga de parámetros en la memoria interna, lectura de estados y orden de arranque.

Espera: una vez recibida la orden de arranque, el sistema emite pulsos, captura señales y evalúa su nivel con el fin determinar si hay rueda a inspeccionar en el carril de medida. Puede programarse para determinar la presencia de rueda en ambos extremos del carril (próximo o lejano al transductor).

Activo: una vez detectada la presencia de rueda en el carril de medida, se entra en este estado en el que se realiza el seguimiento del eco de contacto rueda-carril. Por lo tanto el sistema captura, procesa y almacena información válida en memoria. En este estado, sólo se requiere la intervención del servidor para recoger los datos de la memoria y evitar que se desborde. La actividad concluye cuando la rueda llega al final del carril de medición (en alguno de los dos extremos). En este momento el servidor decide si se lanza un nuevo ciclo desde el estado **Espera** ó se reconfiguran los parámetros de operación.

<i>Parámetros Programados para el Ensayo</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>
Tiempo de adquisición	40 [μ s]
Tiempo de retardo inicial	200 [μ s]
Frecuencia de muestreo	5 [MHz]
Período de repetición de pulsos	2 [ms]

Tabla 4.3: Parámetros programados para realizar la verificación del algoritmo de seguimiento.

4.4.2. Verificación del algoritmo de seguimiento

La verificación del algoritmo de seguimiento se realizó con un ensayo sobre el banco experimental del laboratorio, alejando las ruedas del transductor (también se puede verificar en el sentido contrario). La Tabla 4.3 contiene las variables utilizadas para este ensayo. Para operar en sentido contrario, sólo es preciso variar el tiempo de retardo inicial, ajustándolo al máximo tiempo de vuelo en el carril (2ms).

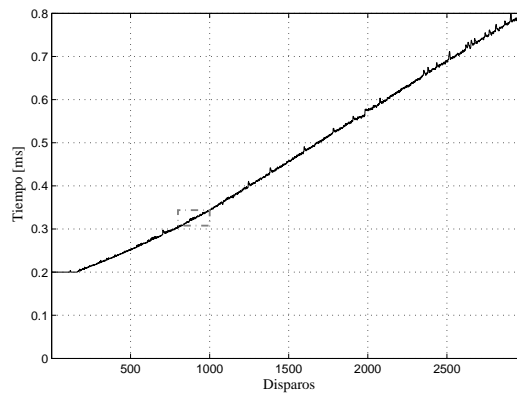
El periodo de repetición de pulsos se determinó en función de la longitud del carril (4.2.2). El tamaño de la ventana de adquisición obtiene señales en una longitud de 6cm de carril, supuestamente alrededor del punto de contacto rueda-carril, valor elegido para comprobar la robustez del algoritmo (el seguimiento se torna más crítico con ventanas más pequeñas).

Los tiempos de retados computados por el algoritmo de seguimiento se muestran en la Figura 4.11a. La curva describe el movimiento no uniforme de las ruedas ya que la aceleración durante el ensayo no fue controlada (las ruedas se mueven a mano). Sin embargo el algoritmo sigue perfectamente al punto de contacto a lo largo del carril, sin pérdidas.

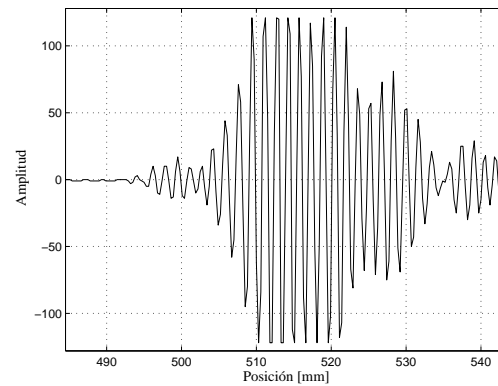
El tiempo de retardo inicial de 0.2ms es un traslado en el origen de tiempos, y sitúa la ventana de adquisición a 30cm del transductor. En la práctica el ajuste del retardo inicial permite situar el transductor en una zona del carril libre del paso de la rueda y evitar la zona ciega inmediata. Obsérvese además que la modificación del tiempo de retardo no se habilita, a pesar de que algoritmo de seguimiento está activo, hasta el disparo #160 momento donde se supera el transitorio inicial de enganche.

En la imagen ampliada del área indicada entre los disparos #892 y #908 (Figura 4.11c), se pueden observar con detalle el comportamiento de las variables implicadas en el seguimiento. La adquisición de datos está limitada por el tiempo de retardo $T_{(i)}$ y la suma $T_{(i)} + T_W$. La posición del máximo en el vector de diferencias ($T_{Q(i)}$) se ubica en torno al centro de la ventana de adquisición.

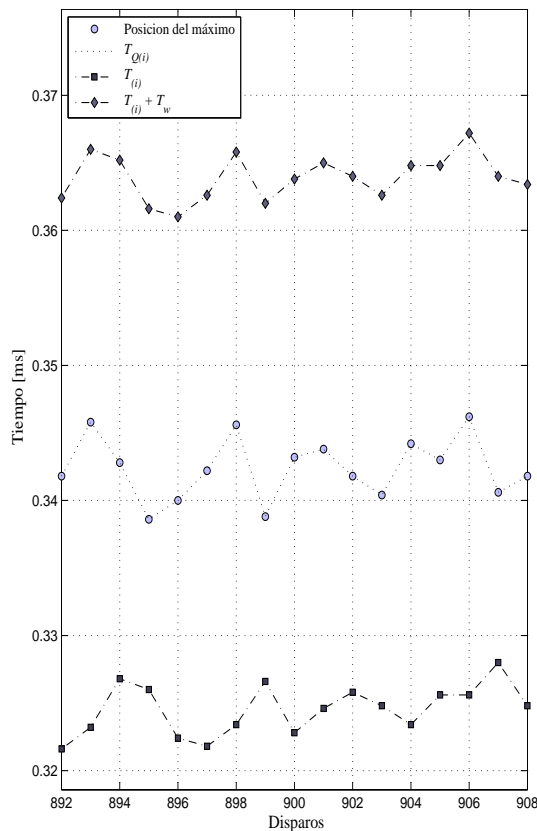
Las capturas del eco de contacto en los disparos #900 y #899 con respecto a su posición en el carril se muestran en las Figuras 4.11b y 4.11d, respectivamente. Las trazas están contaminadas con el ruido estructural del carril. En este caso la interferencia es constructiva y lleva los



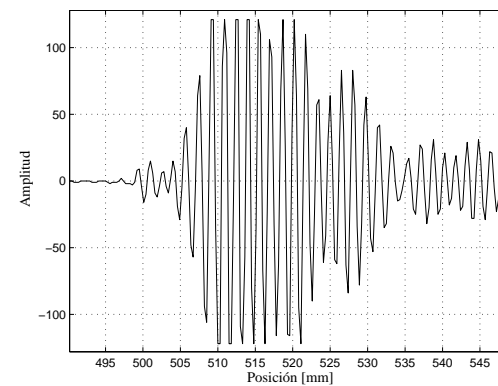
(a) Tiempos de retardos $T_{(i)}$.



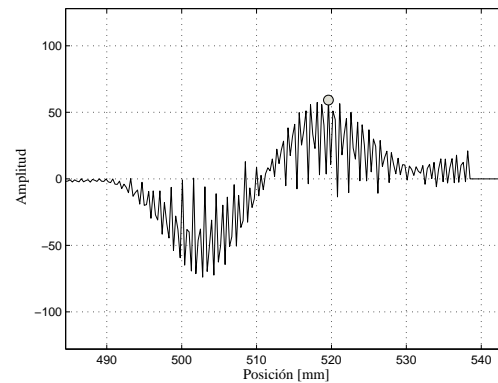
(b) Traza Nro: 900



(c) Zoom entre disparos 892 al 908



(d) Traza Nro: 899



(e) Traza diferencial 900-899

Figura 4.11: Verificación del algoritmo de seguimiento. (a) Tiempos de retardos calculados por el algoritmo de seguimiento; la curva describe movimiento de la rueda sobre el carril cuando se aleja del transductor. (b) Eco del contacto rueda-carril capturado en el disparo 900. (c) Zoom entre disparos 892 y 908; se indican las variables utilizadas en el seguimiento del eco de contacto. (d) Eco del contacto correspondiente al disparo 899. (e) Traza diferencial obtenida de las capturas 900-899 (Eje “Amplitud” expresado en el rango $[-128 \text{ a } +128]$).

<i>Parámetros Utilizados en las Inspecciones</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>
Tiempo de adquisición	60 [μ s]
Frecuencia de muestreo	5 [MHz]
Período de repetición de pulsos	2 [ms]
Velocidad de Propagación c	3000[m/s]

Tabla 4.4: Parámetros programados para realizar las inspecciones de pruebas.

niveles de la señal próximos a la saturación. Sin embargo, con el método de trazas diferenciales planteado como solución en la sección §3.1.6, se puede recuperar la posición del eco de contacto en cada captura.

La traza 900-899 (Figura 4.11e) se obtiene alineando los vectores de adquisición en función de la diferencia $T_{Q(900)} - T_{Q(899)}$. El máximo valor en la señal resultante indica la posición actual de la rueda, mientras que el pico negativo se corresponde con la del disparo precedente. El incremento en el tiempo de vuelo es positivo e igual a 1.8μ s, lo que equivale a un desplazamiento de 9 muestras entre vectores, que se corresponde, a su vez, con el agregado de 9 ceros al final del vector diferencial. En el próximo disparo (#901) el algoritmo de seguimiento ajusta el tiempo de espera ($T_{Q(901)} > T_{Q(900)}$), para mantener centrada la ventana de adquisición en torno al punto de contacto.

4.5. Evaluación de defectos

El proceso de medida propuesto en la sección §2.5.2 utiliza el *teorema 2.3.1 de pérdida de radio* para cuantificar la pérdida de material y posteriormente determinar la longitud del plano original.

Para la evaluación de los defectos presentados en la Tabla 4.2 el ángulo inicial de la rueda se modifica para colocar cada defecto en tres posiciones diferentes del carril de medida: próxima, media y alejada del transductor.

La Tabla 4.4 contiene los parámetros empleados para todos los ensayos. En este caso se ha aumentado la ventana de adquisición a 60μ s (unos 9cm), manteniéndose los restantes valores como en el caso anterior.

Cada rutina inspección de ensayo se efectúa bajo el siguiente procedimiento:

- ① Calcular el tiempo de vuelo al punto de contacto en cada disparo en función del tiempo de retardo $T_{(i)}$ computado por el algoritmo de seguimiento, y del tiempo transcurrido desde el inicio de la adquisición al máximo valor capturado $T_{v(i)}$ (ver Figura 3.7):

$$T_{Q(i)} = T_{(i)} + T_{v(i)}$$

- ② Determinar la posición de la rueda sobre el carril en cada disparo i según (2.5.5):

$$x_{Q(i)} = \frac{c T_{Q(i)}}{2}$$

- ③ Obtener la velocidad instantánea en cada disparo i mediante (2.5.15):

$$v_{Q(i)} = \frac{\Delta T_{Q(i)}}{2 T_{PRF}} c$$

- ④ Hacer una estimación de la velocidad de desplazamiento del tren como la media de las N medidas de v_Q más recientes, de (2.5.16):

$$v_j \approx \frac{1}{N} \left(\sum_{i=j}^{i=j+N-1} v_{Q(i)} \right)$$

En la experimentación, se ha utilizado $N = 100$.

- ⑤ Obtener el desplazamiento entre el punto de contacto y la proyección del centro de la rueda sobre el carril en cada disparo, ecuación (2.5.7):

$$s_{(i)} = \frac{c T_{Q(i)}}{2} - i v T_{PRF}$$

- ⑥ Convolucionar cada vector $s_{(i)}$ con una ventana rectangular de amplitud unitaria $\mathbf{w}(M)$ y de anchura variable $M = 2 : 5 : 250$ muestras, para obtener las secuencias $d_k(M)$. Es decir:

for $M = 2 : 5 : 250$

$$d_k(M) = s * \mathbf{w}(M)$$

$$d_e(M) = v T_{PRF} (|\text{máx}(d_k(M))| + |\text{mín}(d_k(M))|) / 2R$$

end

donde cada secuencia $d_k(M)$ que se obtiene para un ancho M de ventana tiene dos picos, uno negativo y otro positivo correspondientes a los semiciclos de s (ver Figura 2.15). Sus valores absolutos escalados por el factor $v T_{PRF} / R$ deberían ser equivalentes a la pérdida de radio d pero, por efectos del ruido remanente en la señal, se obtiene una mejor estimación haciendo un promedio de sus amplitudes ($d_e(M)$).

- ⑦ En función de cada valor estimado $d_e(M)$ determinar la longitud del plano inicial:

$$L_e(M) \approx \sqrt{8 R d_e(M)}$$

En los ensayos se utilizan ventanas de integración de diferentes longitudes para analizar el comportamiento en las estimaciones en d_e y L_e con señales reales. En el caso de aplicaciones reales se debe considerar la presencia de planos múltiples, y por tanto el valor de M no debería exceder a la distancia entre planos consecutivos.

4.5.1. Ensayos *Rueda 1*

Para evaluar el comportamiento de los algoritmos que cuantifican la pérdida de radio, se tomaron medidas del defecto de mayor tamaño (*Rueda 1*) a diversas distancias del transductor. En particular a distancias cortas, medias y alejadas (500, 1000 y 2000mm, respectivamente).

Para ello la rueda se alza sobre los carriles de medida con ayuda de una plataforma elevadora, se gira y se deposita de nuevo sobre el carril, de forma que el defecto quede ubicado a la distancia especificada. A continuación, la rueda se mueve a la posición de origen y se habilita el proceso de adquisición. La rueda se desplaza a mano sobre el carril tomando las medidas con el sistema de seguimiento, almacenándose para su posterior procesamiento. El proceso se repite para las otras posiciones del defecto en el carril de medida.

Defecto a 500mm

La Figura 4.12a muestra la posición del punto de contacto en función del número de disparo ($x_{Q(i)}$). La zona de discontinuidad en la curva de posición ha sido marcada y mostrada con detalle en la Figura 4.12b; además se ha graficado la posición de la proyección del centro de la rueda sobre el carril ($x_{P(i)}$) obtenida en cada disparo mediante un filtro de media móvil de 100 puntos. La velocidad media de la rueda en torno a la irregularidad es $v = 0.315\text{m/s}$ y el intervalo espacial de muestreo es $\Delta x = v T_{PRF} = 0.63\text{mm}$.

Se puede observar el cambio de posición registrado por el sistema cuando el punto de contacto se sitúa sobre una irregularidad. La pendiente de $x_{Q(i)}$ cambia entre los disparos #220 al #300, o bien durante un intervalo temporal $\Delta t = 160\text{ms}$. Considerando la velocidad media de paso, el salto en la posición del punto de contacto es $v \Delta t \approx 50\text{mm}$, valor que ofrece una primera estimación de la longitud del defecto. Sin embargo es una medida poco fiable ya que depende del intervalo elegido para su determinación, no exento de subjetividad al tener que apreciar cuándo se producen los cambios de pendiente. Por otra parte, en general, este valor no coincide con las dimensiones del plano original sino del actual que puede haber sido sometido a

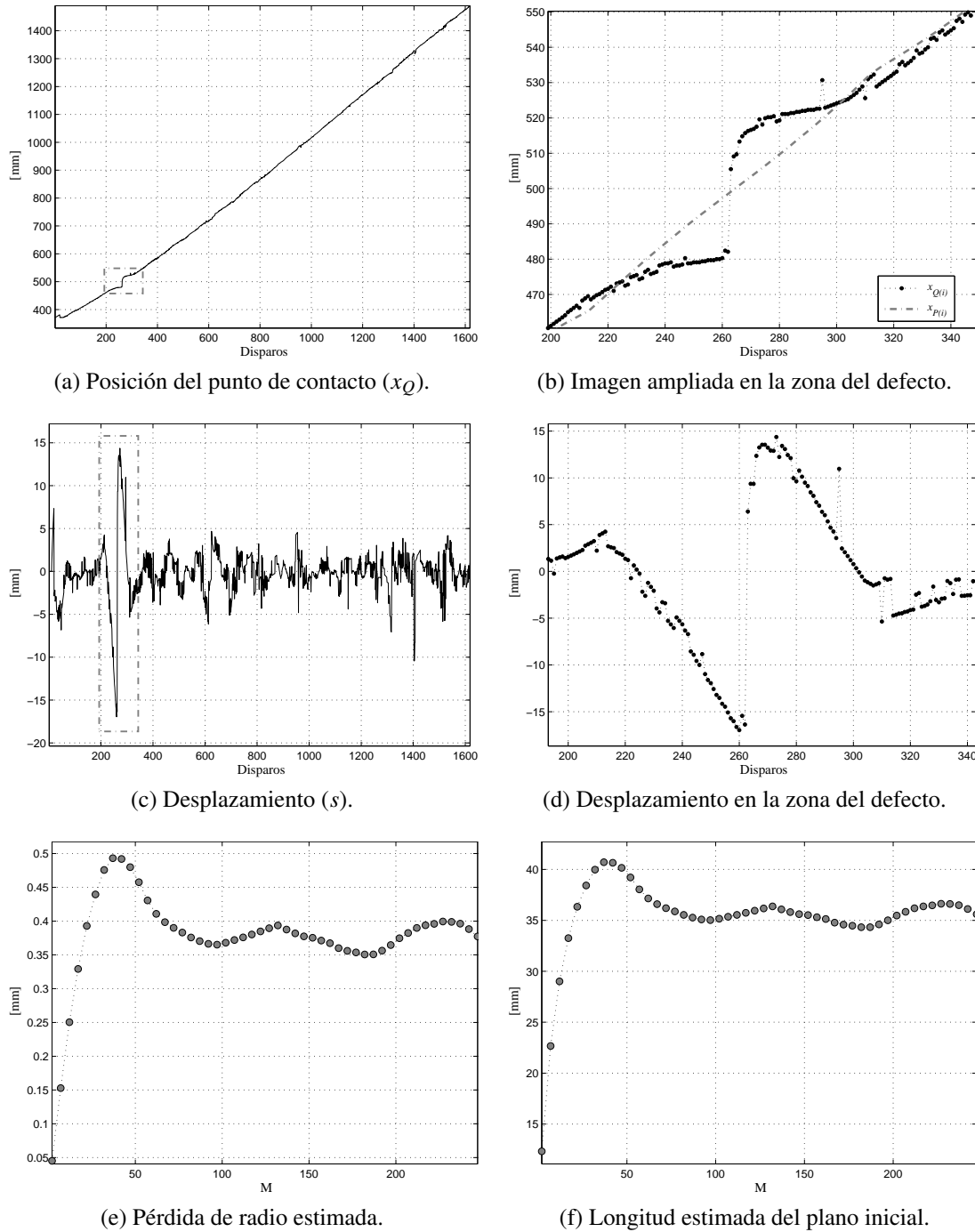


Figura 4.12: Test con Rueda 1. (a) El defecto se encuentra a 500mm del transductor, en la zona re-marcada. (b) La posición $x_{P(i)}$ fue obtenida por un filtro de media móvil de 100 puntos. La velocidad media de la rueda durante la inspección es $v = 0.315\text{m/s}$. (c) Desplazamiento entre el punto de contacto y la proyección del centro de la rueda sobre el carril. (d) Zoom en la región de interés. Observar la contaminación con el ruido residual de la señal de desplazamiento. (e) Pérdida estimada de radio $d_e(M)$, donde $d_{e_{\max}} = 0.49\text{mm}$, $d_{e_{\text{mean}}} = 0.39\text{mm}$, $\sigma_{d_e} = 0.03\text{mm}$. (f) Estimación de la longitud del plano inicial en función de $L_e(M)$, donde $L_{e_{\max}} = 40.70\text{mm}$, $L_{e_{\text{mean}}} = 36.12\text{mm}$, $\sigma_{L_e} = 1.53\text{mm}$.

desgaste y, por consiguiente, de mayor longitud (como es el caso). Como consecuencia, resulta un método poco robusto para estimar la pérdida de radio sufrida por abrasión.

La Figura 4.12c muestra la traza del desplazamiento entre el punto de contacto y la proyección del centro de rueda sobre el carril, $s_{(i)} = x_{P(i)} - x_{Q(i)}$. La imagen ampliada de la zona indicada en 4.12c se muestra en la Figura 4.12d.

Tal como se había planteado en la cinemática del punto de contacto rueda-carril (sección §2.4.1), el comportamiento de s presenta dos semiciclos cuando la rueda se apoya sobre una zona irregular. El semiciclo negativo de s indica un retraso del punto de contacto Q respecto a la proyección P del centro de la rueda sobre el carril, mientras que el positivo es un adelanto de Q respecto P .

Es importante notar que la señal s está contaminada de ruido residual, resultante de la incertidumbre al evaluar la posición del máximo del eco, sometido a interferencia con el ruido estructural. Éste hace que las áreas encerradas en ambos semiciclos no sean equivalentes. De aquí que convenga realizar un promediado entre ambas áreas para mejorar la estimación.

La Figura 4.12e muestra la pérdida de radio $d_e(M)$ estimada para diferentes anchos de ventana M , según el procedimiento de inspección descrito previamente (paso ⑥). Se observa que la estimación presenta errores por defecto para valores de $M < 17$, o bien ($M_x = M \Delta x < 10.60\text{mm}$). La máxima estimación se obtiene para un valor $M = 37$ ($M_x = 23.07\text{mm}$), para el que $d_e(37) = 0.49\text{mm}$, un valor un poco superior al real medido por perfilometría (0.46mm). Para $M > 37$ el valor estimado d_e se estabiliza en torno al valor medio $d_{e_{mean}} = 0.39\text{mm}$ con una desviación estándar de $\sigma_{d_e} = 0.03\text{mm}$.

La estimación del plano inicial $L_e(M)$ en función de los valores $d_e(M)$ encontrados se muestra en la Figura 4.12f. El comportamiento de la curva es similar a la de estimación de pérdida de radio; la máxima longitud estimada se encuentra en $L_e(40) = 41.5\text{mm}$, valor muy próximo al real $L = 40.70\text{mm}$. Para ventanas de integración $M > 40$ los valores se estabilizan en torno al valor medio de $L_{e_{mean}} = 36.12\text{mm}$ con una desviación $\sigma_{L_e} = 1.53\text{mm}$.

Defecto a 1000mm

La Figura 4.13 muestra los resultados del segundo ensayo con la misma rueda pero esta vez el defecto se ubica en la zona media del carril. La Figura 4.13a muestra la posición de la rueda para cada disparo, y la Figura 4.13b muestra una imagen ampliada de la posición en la zona del defecto. La velocidad medida de la rueda en torno a la discontinuidad es $v = 0.440\text{m/s}$, y el intervalo espacial de muestreo es $\Delta x = v T_{PRF} = 0.88\text{mm}$.

El desplazamiento entre el punto de contacto y la proyección de la rueda sobre el carril se muestra en la Figura 4.13c, mientras la Figura 4.13d muestra con detalle el desplazamiento s en la zona de la irregularidad. Se observa también que la señal está contaminada con el ruido

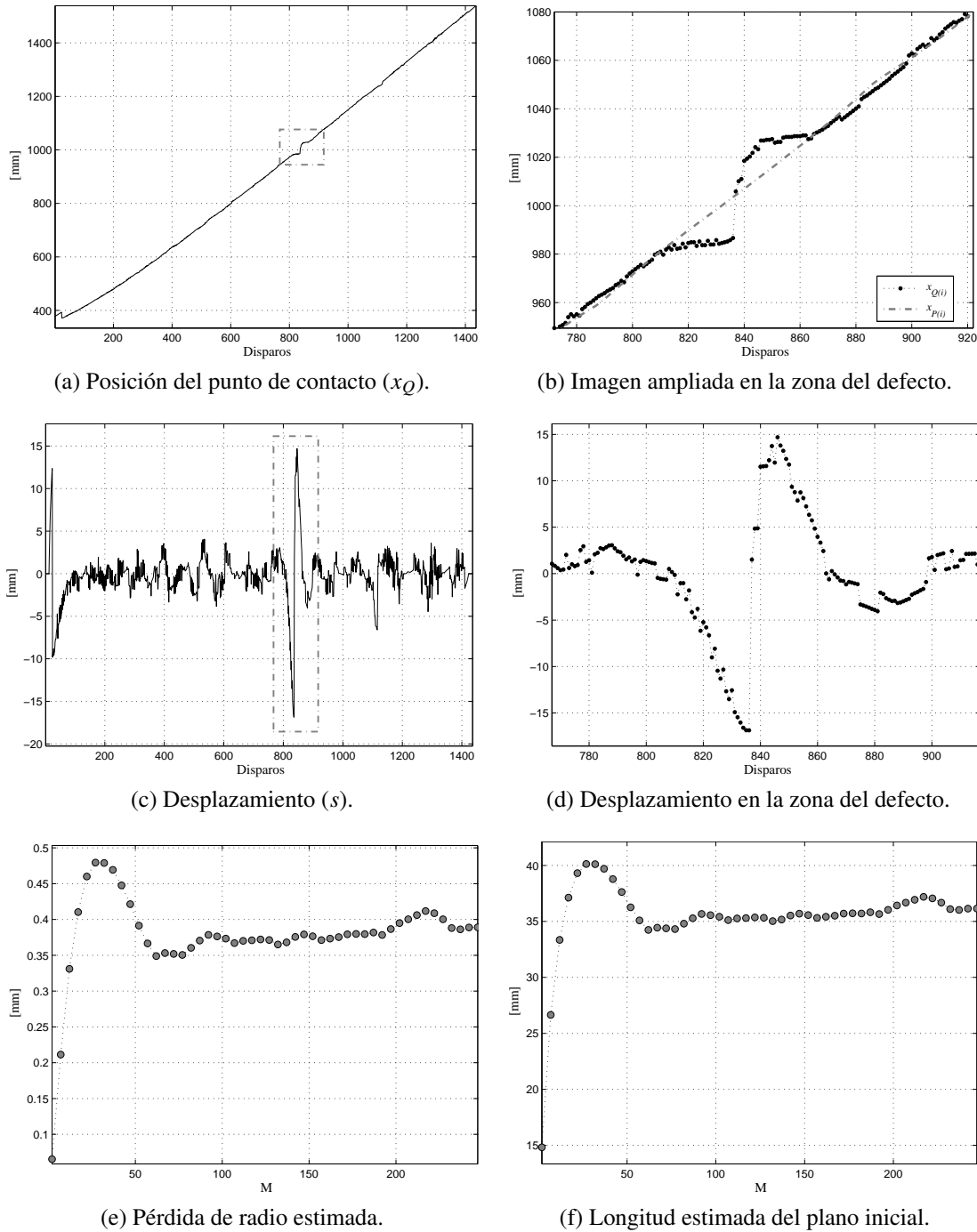


Figura 4.13: Test con Rueda 1. (a) El defecto se encuentra a 1000mm del transductor (zona marcada). (b) La posición $x_{P(i)}$ fue obtenida por un filtro de media móvil de 100 puntos. La velocidad media de la rueda durante la inspección es $v = 0.440\text{mm/s}$. (c) Desplazamiento entre el punto de contacto y la proyección del centro de la rueda sobre el carril. (d) Zoom en la región de interés. Observar la contaminación con el ruido residual de la señal de desplazamiento. (e) Pérdida estimada de radio $d_e(M)$, donde $d_{e_{\max}} = 0.48\text{mm}$, $d_{e_{\text{mean}}} = 0.39\text{mm}$, $\sigma_{d_e} = 0.03\text{mm}$. (f) Estimación de la longitud del plano inicial en función de $L_e(M)$, donde $L_{e_{\max}} = 40.13\text{mm}$, $L_{e_{\text{mean}}} = 36.03\text{mm}$, $\sigma_{L_e} = 1.37\text{mm}$.

residual, y afecta a la determinación de la posición del eco con exactitud.

La estimación de la pérdida de radio obtenida para cada ancho M de la ventana de integración se muestra en la Figura 4.13e. La estimación media $d_{e_{mean}}=0.39\text{mm}$ apenas por debajo del valor de pérdida real (0.46mm). La máxima pérdida de material estimada $d_{e_{max}}$ es 0.48mm y se obtiene con un ancho de ventana $M=27$ (o bien $M_x=23.8\text{mm}$).

En función de los valores estimados $d_e(M)$ se obtiene la longitud del plano inicial $L_e(M)$ (Figura 4.13f). El máximo valor estimado $L_e(27)=40.13\text{mm}$ y el valor medio es 36.03mm con una desviación estándar de $\sigma_{L_e}=1.37\text{mm}$.

Defecto a 2000mm

En este tercer ensayo, con la misma rueda, el defecto se encuentra ubicado a 2000mm del transductor (Figura 4.14a). La velocidad media de paso de la rueda sobre la irregularidad es $v=0.544\text{m/s}$, por tanto el intervalo espacial de muestreo es $\Delta x = 1.6\text{mm}$ (Figura 4.14b).

La relación señal-ruido en el tramo final del carril empeora, tal como se verificó con las mediciones mostradas en la sección §3.1.5 (ver Figura 3.6), pues el nivel de la señal se atenúa a mayor distancia. Además el ruido estructural, producido por el carril de medida, interfiere de manera no uniforme apareciendo situaciones donde la estimación de la posición de la rueda resulta difícil y por tanto el desplazamiento s es menos definido (Figura 4.14c). Sin embargo, la morfología de la señal de desplazamiento en la zona del defecto se mantiene (Figura 4.14d), mostrando un ciclo negativo seguido de otro positivo. Obsérvese que la incertidumbre en la determinación de la posición del eco de contacto produce una señal s ruidosa, con una amplitud del ruido poco menor que la de la señal útil.

La máxima estimación en la pérdida de radio encontrada es $d_{e_{max}} = 0.56\text{mm}$, y la pérdida media es $d_{e_{mean}} = 0.48\text{mm}$ con una desviación estándar $\sigma_{d_e} = 0.04\text{mm}$ (Figura 4.14e). Obsérvese que, a pesar de tener un mayor contenido de ruido, la estimación sigue siendo muy próxima a la real ($d = 0.46\text{mm}$) con una muy pequeña desviación estándar.

La longitud del plano inicial calculado a partir de las estimaciones $d_e(M)$ se muestran en la Figura 4.14f. La longitud máxima encontrada $L_{e_{max}}=43.72\text{mm}$ y coincide cuando el ancho de la ventana de integración es próxima al tamaño del defecto $M=22$ (ó bien $M_x = \Delta x M = 35.92\text{mm}$), luego la longitud estimada del defecto se estabiliza en torno al valor medio $L_{e_{mean}}=40.30\text{mm}$ con una desviación estándar $\sigma_{L_e}=1.68\text{mm}$.

Los valores encontrados para el mismo defecto evaluado en tres partes diferentes del carril no difieren mucho del real, presentando errores que son perfectamente tolerables en este tipo de aplicaciones. Además, se ha mostrado la robustez de la técnica de medida frente al ruido y a la estimación de un plano degenerado (*Etapa III*) asimétrico.

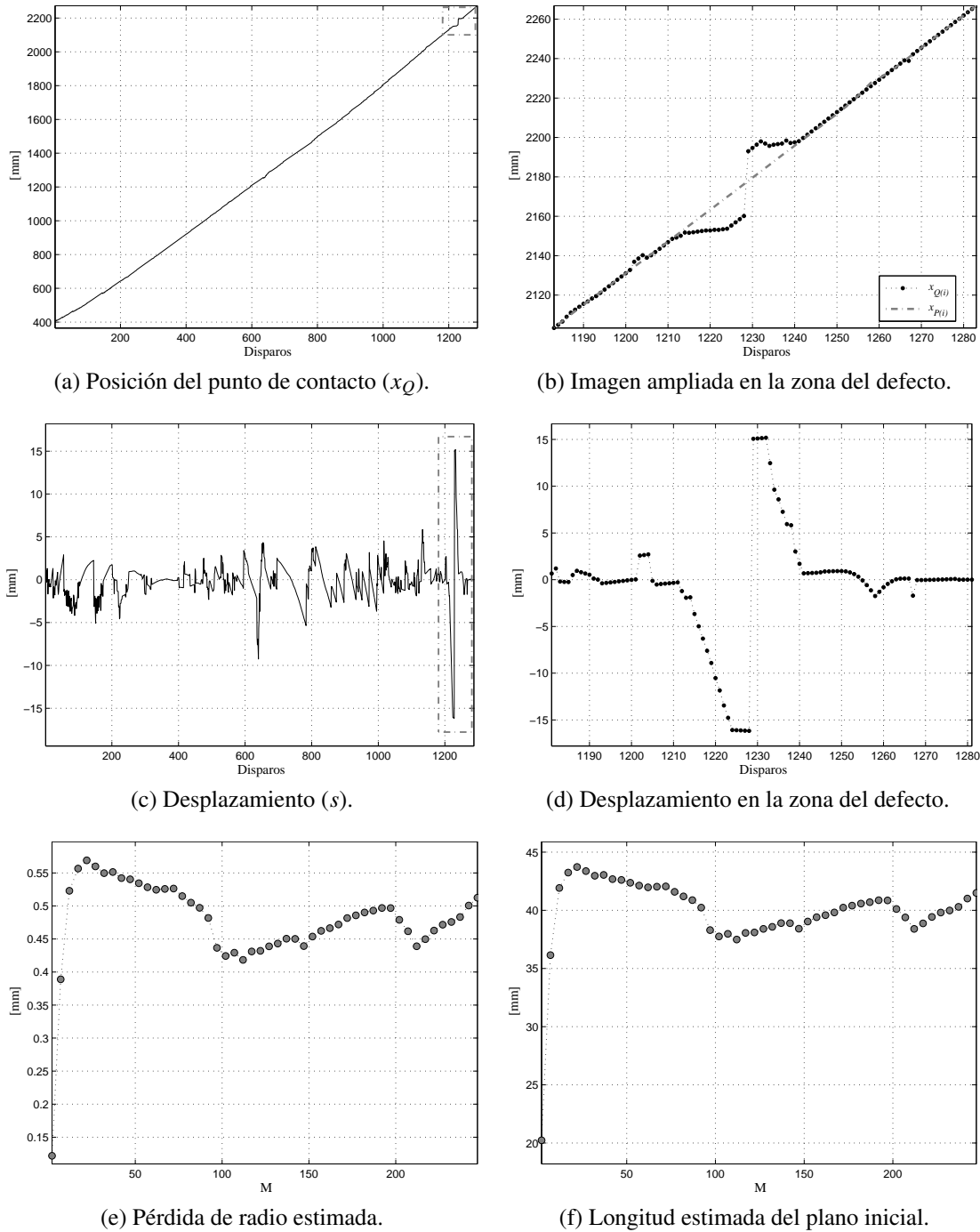


Figura 4.14: Test con Rueda 1. (a) El defecto se encuentra a 2000mm del transductor (zona marcada). (b) La posición $x_{P(i)}$ fue obtenida por un filtro de media móvil de 100 puntos. La velocidad media de la rueda durante la inspección es $v = 0.544\text{m/s}$. (c) Desplazamiento entre el punto de contacto y la proyección del centro de la rueda sobre el carril. (d) Zoom en la región de interés. Observar que la contaminación con el ruido residual de la señal de desplazamiento es mayor a los ensayos anteriores. (e) Pérdida estimada de radio $d_e(M)$, donde $d_{e\max} = 0.56\text{mm}$, $d_{e\text{mean}} = 0.48\text{mm}$, $\sigma_{d_e} = 0.04\text{mm}$. (f) Estimación de la longitud del plano inicial en función de $L_e(M)$, donde $L_{e\max} = 43.72\text{mm}$, $L_{e\text{mean}} = 40.30\text{mm}$, $\sigma_{L_e} = 1.68\text{mm}$.

4.5.2. Ensayos *Rueda 2*

Con este ensayo se pretende evaluar un defecto de menor tamaño, posicionado a 700, 900, y 1300mm del transductor, y determinar la fiabilidad del sistema de medición junto con el procedimiento de evaluación de defectos. El defecto actual, correspondiente a un plano original de unos 26mm de longitud, es muy inferior a los que empiezan a considerarse críticos en el ámbito ferroviario (a partir 40mm).

Defecto a 700mm

La posición instantánea de la rueda para cada disparo se muestra en la Figura 4.15a, donde se ha marcado la ubicación del defecto que se muestra más en detalle en la Figura 4.15b. La velocidad medida en torno al defecto es $v = 0.215\text{m/s}$, por tanto el intervalo espacial de muestreo es $\Delta x = 0.43\text{mm}$.

La pendiente de $x_{Q(i)}$ cambia entre los disparos #980 y #1050, equivalente a un intervalo temporal $\Delta t = 140\text{ms}$, siendo el salto en la posición del punto de contacto $v\Delta t = 30\text{mm}$. Esta discontinuidad es indicativa de un defecto, pero la dimensión del salto es poco fiable ya que no se puede determinar con exactitud el intervalo de Δt .

La diferencia s entre la posición del punto de contacto y la proyección de la rueda sobre el carril se muestra en la Figura 4.15c. El ruido afecta mucho más a la calidad de la señal de desplazamiento s ya que el defecto que se busca es de menor tamaño (Figura 4.15d).

La pérdida de radio estimada tiene un valor medio $d_{e\text{mean}} = 0.17\text{mm}$ con una desviación $\sigma_{d_e} = 0.01\text{mm}$ (Figura 4.15e). La máxima estimación se da para una ventana $M = 42$ (ó bien $M_x = 18.03\text{mm}$) donde $d_e(42) = 0.21\text{mm}$.

En función de las estimaciones $d_e(M)$ se obtiene la longitud del plano inicial $L_e(M)$; el valor medio $L_{e\text{mean}} = 24.14\text{mm}$ y una desviación estándar $\sigma_{L_e} = 0.75\text{mm}$. El máximo valor del plano inicial estimado es $L_e(42) = 27.07\text{mm}$ (Figura 4.15f).

Defecto a 900mm

Los resultados del segundo ensayo se muestran en la Figura 4.16. El defecto se ubica a 900mm del transductor (Figura 4.16a) y la velocidad media de la rueda en torno a la posición del defecto es $v = 0.257\text{m/s}$, el intervalo espacial de muestreo es $\Delta x = 0.51\text{mm}$ (Figura 4.16b).

En las Figuras 4.16c y 4.16d puede verse la señal de desplazamiento s y los detalles en la zona del defecto respectivamente.

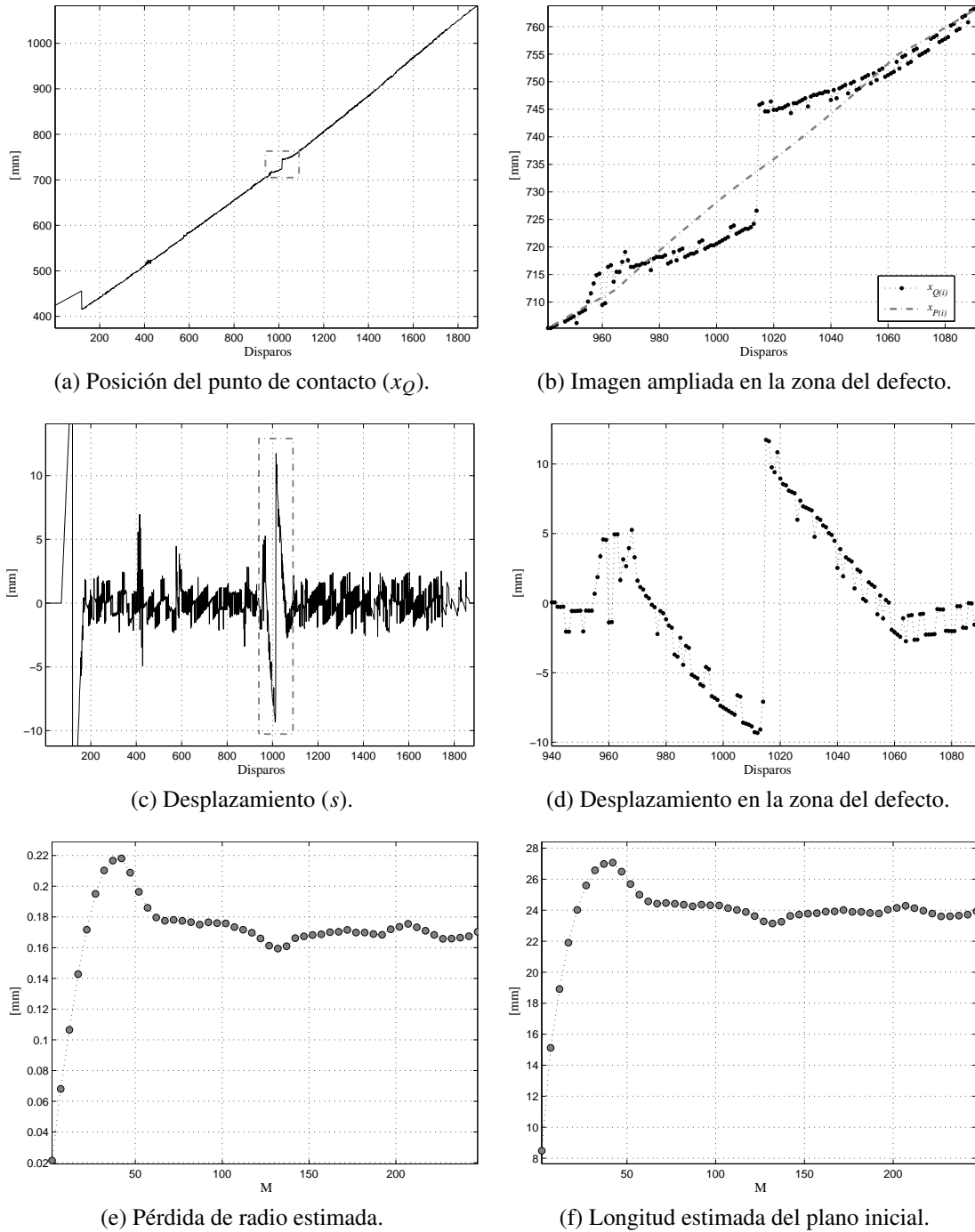


Figura 4.15: Test con Rueda 2. (a) El defecto se encuentra a 700mm del transductor (zona marcada). (b) La posición $x_{P(i)}$ fue obtenida por un filtro de media móvil de 100 puntos. La velocidad media de la rueda durante la inspección es $v = 0.215\text{m/s}$. (c) Desplazamiento entre el punto de contacto y la proyección del centro de la rueda sobre el carril. (e) Pérdida estimada de radio $d_e(M)$, donde $d_{e_{\max}} = 0.21\text{mm}$, $d_{e_{\text{mean}}} = 0.17\text{mm}$, $\sigma_{d_e} = 0.01\text{mm}$. (f) Estimación de la longitud del plano inicial en función de $L_e(M)$, donde $L_{e_{\max}} = 27.07\text{mm}$, $L_{e_{\text{mean}}} = 24.14\text{mm}$, $\sigma_{L_e} = 0.75\text{mm}$.

La pérdida de radio estimada $d_e(M)$ se presenta en la Figura 4.16e. La máxima estimación se da para una ventana de ancho $M = 37$ ($M_x = 19\text{mm}$) $d_e(37) = 0.20\text{mm}$ y luego las estimaciones se estabilizan en torno al valor medio $d_{e\text{mean}} = 0.16\text{mm}$ y con una desviación estándar $\sigma_{d_e} = 0.01$.

La longitud del plano inicial estimado L_e en función de las pérdidas obtenidas se muestra en la Figura 4.16f, con un valor máximo $L_e(37) = 25.94\text{mm}$ y un valor medio $L_{e\text{mean}} = 23.02\text{mm}$ de $\sigma_{L_e} = 0.87\text{mm}$ de desviación estándar.

Defecto a 1300mm

Los resultados del último ensayo se muestran en la Figura 4.17. El defecto se ubica a 1300mm del transductor (Figuras 4.17a y 4.17b). La velocidad media de la rueda durante su paso por el carril de inspección es $v = 0.340\text{m/s}$.

La pérdida estimada de radio $d_e(M)$ se muestra en la Figura 4.17e, cuyo valor máximo se obtiene para una ventana $M = 37$ ($M_x = 25.28\text{mm}$), $d_e(37) = 0.16\text{mm}$. La pérdida media estimada es $d_{e\text{mean}} = 0.15\text{mm}$ con una desviación estándar $\sigma_{d_e} = 0.01\text{mm}$.

Utilizando las estimaciones $d_e(M)$ se obtiene la longitud del plano inicial $L_e(M)$ que se muestra en la Figura 4.17f. El valor máximo alcanzado en las estimaciones es $L_{e\text{max}} = 23.33\text{mm}$. Las estimaciones se estabilizan en torno a un valor medio $L_{e\text{mean}} = 22.06\text{mm}$ con una desviación estándar $\sigma_{L_e} = 0.59\text{mm}$.

4.5.3. Análisis de resultados

La Tabla 4.5 contiene un resumen de los resultados obtenidos en los ensayos. Todas las estimaciones máximas de d_e presentan un mínimo error respecto al valor verdadero, situación que ocurre cuando la longitud de la ventana de integración es próxima a la del defecto. Sin embargo el error se incrementa cuando las mediciones se hacen en zonas distantes del transductor (a partir de 1300mm). En esta región la atenuación del pulso de interrogación es importante y, tal como se anticipó en la Sección §3.1.7, el ruido estructural producido por el carril de medida interfiere mucho más a la señal de eco. Aparecen con mayor facilidad situaciones en las que la interferencia es destructiva y la señal de eco desaparece, y otras donde el ruido estructural supera a la propia señal de eco. Por tanto resulta más difícil de estimar de manera correcta posición del eco de contacto.

Las estimaciones medias $d_{e\text{mean}}$ en el defecto de la *Rueda 1* (defecto de mayor longitud) presentan un error inferior al 16 %, que en términos absolutos significa una inexactitud de 0.07mm. Por otra parte los las estimaciones medias en el defecto de la *Rueda 2* presentan errores relativos de hasta el 25 %, que en términos absolutos representan 0.05mm. El aumento se debe, en gran parte, a que las amplitudes de los semiciclos de la señal s son comparables con los

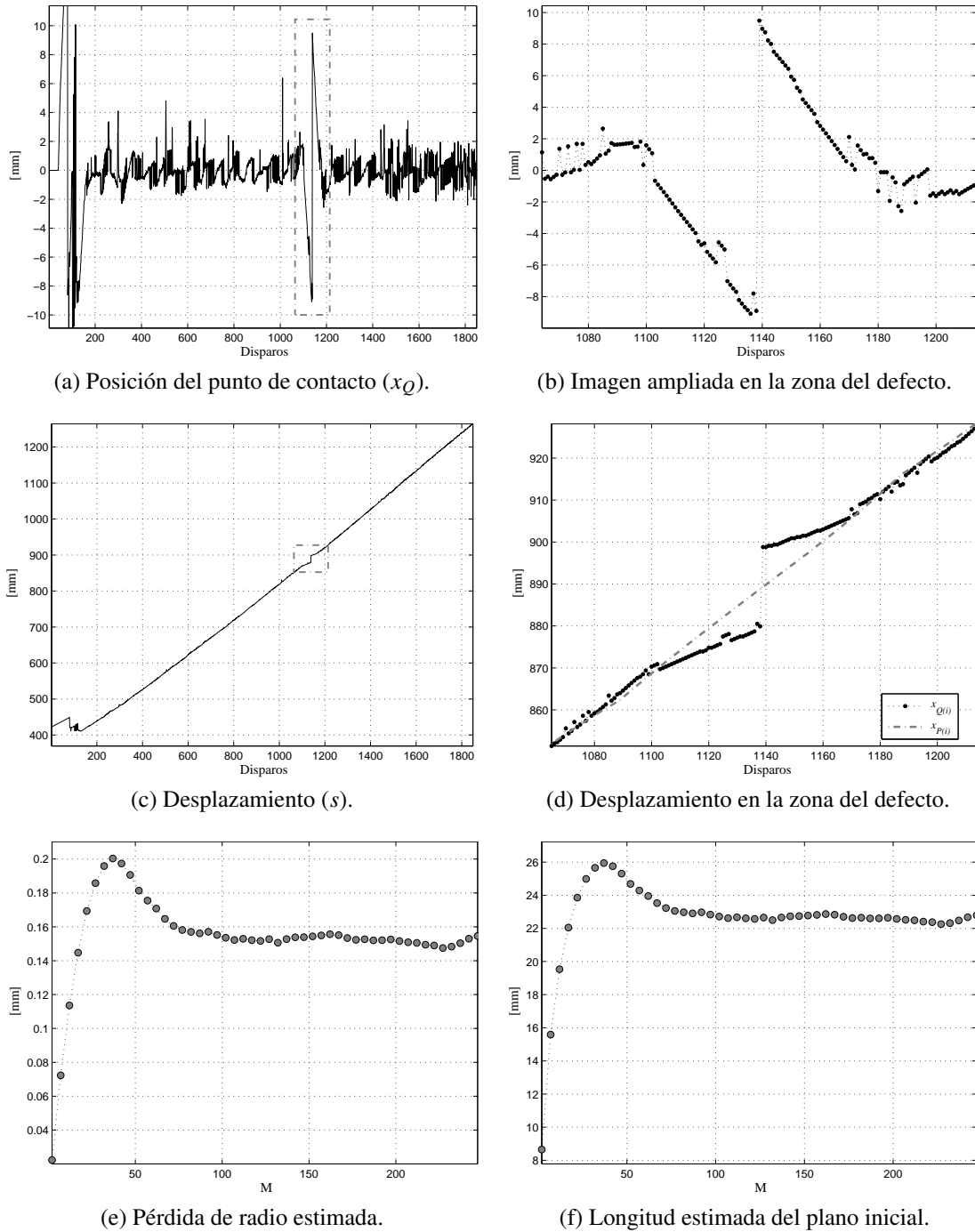


Figura 4.16: Test con Rueda 2. (a) El defecto se encuentra a 900mm del transductor (zona marcada). (b) La posición $x_{P(i)}$ fue obtenida por un filtro de media móvil de 100 puntos. La velocidad media de la rueda durante la inspección es $v = 0.257\text{m/s}$. (c) Desplazamiento entre el punto de contacto y la proyección del centro de la rueda sobre el carril. (d) Zoom en la región de interés. Observar que el ruido residual de la señal afecta a la calidad de la señal de desplazamiento. (e) Pérdida estimada de radio $d_e(M)$, donde $d_{e_{\max}} = 0.20\text{mm}$, $d_{e_{\text{mean}}} = 0.16\text{mm}$, $\sigma_{d_e} = 0.01\text{mm}$. (f) Estimación de la longitud del plano inicial en función de $L_e(M)$, donde $L_{e_{\max}} = 25.94\text{mm}$, $L_{e_{\text{mean}}} = 23.02\text{mm}$, $\sigma_{L_e} = 0.87\text{mm}$.

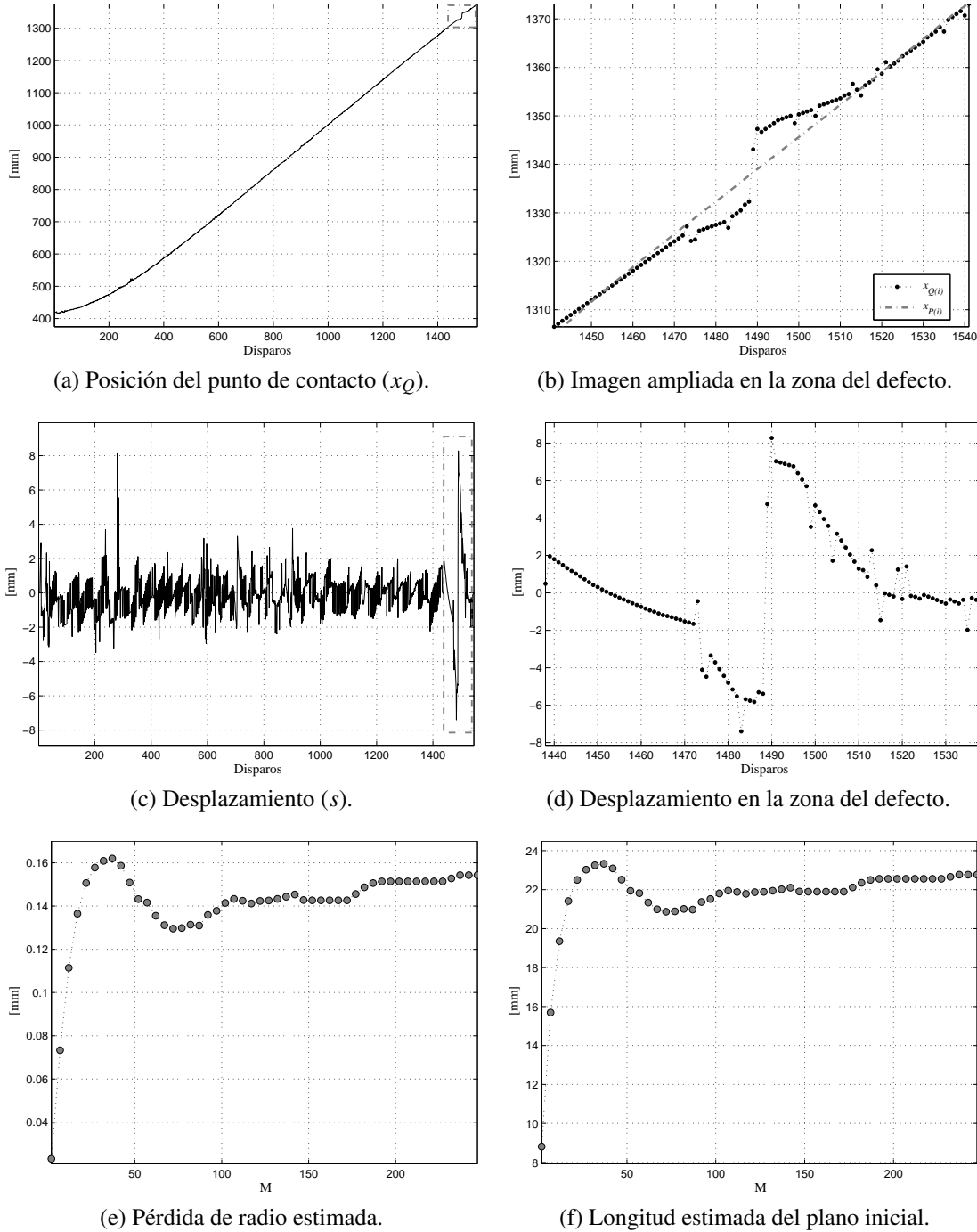


Figura 4.17: Test con Rueda 2. (a) El defecto se encuentra a 1300mm del transductor (zona marcada). (b) La posición $x_{P(i)}$ fue obtenida por un filtro de media móvil de 100 puntos. La velocidad media de la rueda durante la inspección es $v = 0.340\text{m/s}$. (c) Desplazamiento entre el punto de contacto y la proyección del centro de la rueda sobre el carril. (d) Zoom en la región de interés. Observar que el ruido residual de la señal afecta a la calidad de la señal de desplazamiento. (e) Pérdida estimada de radio $d_e(M)$, donde $d_{e_{\max}} = 0.16\text{mm}$, $d_{e_{\text{mean}}} = 0.15\text{mm}$, $\sigma_{d_e} = 0.01\text{mm}$. (f) Estimación de la longitud del plano inicial en función de $L_e(M)$, donde $L_{e_{\max}} = 23.33\text{mm}$, $L_{e_{\text{mean}}} = 22.06\text{mm}$, $\sigma_{L_e} = 0.59\text{mm}$.

	Rueda 1			Rueda 2		
d [mm]	0.46			0.20		
L [mm]	39.3			25.9		
Posición [mm]	500	1000	2000	700	900	1300
Velocidad [m/s]	0.315	0.440	0.544	0.215	0.257	0.340
Δ_x [mm]	0.63	0.88	1.6	0.43	0.51	0.68
$d_{e_{max}}$ [mm]	0.49	0.48	0.56	0.21	0.20	0.16
$\varepsilon(d_{e_{max}})$ %	6.52 %	4.34 %	21.73 %	5.00 %	0.00 %	-20.00 %
$d_{e_{mean}}$ [mm]	0.39	0.39	0.48	0.17	0.16	0.15
σ_{d_e} [mm]	0.03	0.03	0.04	0.01	0.01	0.01
$\varepsilon(d_{e_{mean}})$ %	-15.21 %	-15.21 %	4.34 %	-15.00 %	-20.00 %	-25.00 %
$L_{e_{max}}$ [mm]	40.70	40.13	43.72	27.07	25.94	23.33
$\varepsilon(L_{e_{max}})$ %	3.56 %	2.11 %	11.24 %	4.51 %	0.15 %	-9.92 %
$L_{e_{mean}}$ [mm]	36.12	36.03	40.30	24.14	23.02	22.06
σ_{L_e} [mm]	1.53	1.37	1.68	0.75	0.87	0.59
$\varepsilon(L_{e_{mean}})$ %	-8.09 %	-8.32 %	-2.54 %	-6.79 %	-11.12 %	-14.82 %

Tabla 4.5: Tabla comparativa de los defectos valuados en diferentes posiciones del carril.

niveles del ruido remanente que hace más incierta la posición del eco de contacto. No obstante, en cualquiera de los casos, la resolución con la que se estima la pérdida de radio de la rueda es muy superior a los métodos descritos en la Sección §1.5.

En cuanto a la estimación de la longitud de los planos iniciales L_e , es importante recordar que se obtienen en función de una raíz cuadrada de d_e . La Figura 4.18 muestra la dependencia $L = f(d)$, donde se observa que para $d < 0.5\text{mm}$, pequeños cambios en la estimación de la pérdida de radio produce mayores variaciones en el valor calculado de la longitud del plano. Esto explica en parte la mayor disparidad en los valores L_e obtenidos del ensayo con la Rueda 2, donde la estimaciones alcanzan errores de hasta el 15 %. Para valores de $d > 0.5\text{mm}$ la dependencia de L en función de d se vuelve casi proporcional, por este motivo las estimaciones L_e en los ensayos con la Rueda 1 son más homogéneos y los errores no superan el 9 %.

Desde el punto de vista del mantenimiento ferroviario resulta muy importante determinar con buena precisión la máxima variación del radio, ya que a partir de la mayor pérdida de material encontrada se puede determinar la profundidad de torneado (si la rueda debe ser re-perfilada) o retirar la rueda de servicio.

En todos los ensayos realizados con los defectos situados en distintas posiciones del carril, las estimaciones de d_e se mantienen con un error por debajo del 25 % mientras que en las estimaciones de L_e los errores no son superiores al 16 %. En condiciones ideales, como se analizó en la Sección §3.1.2, se esperaban errores máximos en las estimaciones de d_e del 12.5 % y del 6.5 % para las de L_e si se tiene en cuenta, únicamente, el proceso de medida.

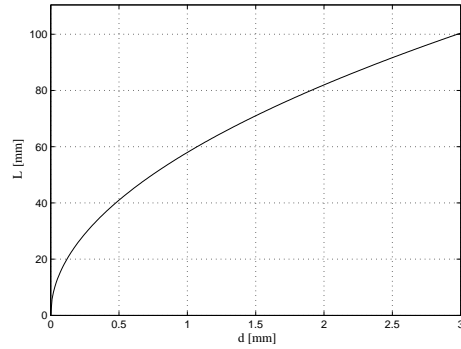


Figura 4.18: Largo de plano inicial L en función de la pérdida de material d , según $L = \sqrt{8 d R}$ ($R=420\text{mm}$).

Los resultados obtenidos dan errores relativos sensiblemente superiores, que deben ser asociados al ruido, indeterminaciones en la estimación del tiempo de vuelo. Sin embargo, los errores en las medidas (de hasta un 16 % en la estimación de la longitud del plano inicial y de un 25 % en la pérdida de radio) son admisibles y suponen un salto cualitativo importante respecto a otras técnicas.

4.5.4. Efectos de la velocidad en las estimaciones

La velocidad de paso de la rueda sobre el carril de inspección influye directamente en la resolución del sistema según se establece en (3.1.17):

$$L_{min} = 2 v T_{PRF}$$

Para evaluar cómo afecta la velocidad a la que se desplaza la rueda en las estimaciones de d_e y L_e , se parte de un ensayo realizado con movimiento lento. En este caso se consideró el ensayo realizado con la *Rueda 1* y el defecto ubicado a 500mm del transductor (Figura 4.12), aunque la metodología es válida para cualquier caso. El aumento de la velocidad se consigue al diezmar la señal s mostrada en la Figura 4.12c, por un factor n de 1 al 10 (tomando 1 de cada n muestras).

La evaluación del defecto se realiza aplicando el mismo procedimiento utilizado en los ensayos anteriores salvo que la ventana de integración se limita a una longitud máxima de 150mm.

En general para el factor de diezmado $n = 1 : 10$ se aplica el siguiente algoritmo de evaluación:

- ① A partir de la señal registrada s , donde cada muestra ha sido adquirida en un tiempo $s(i) = s(i T_{PRF})$, se obtiene una nueva secuencia $s_{(n)}$ como:

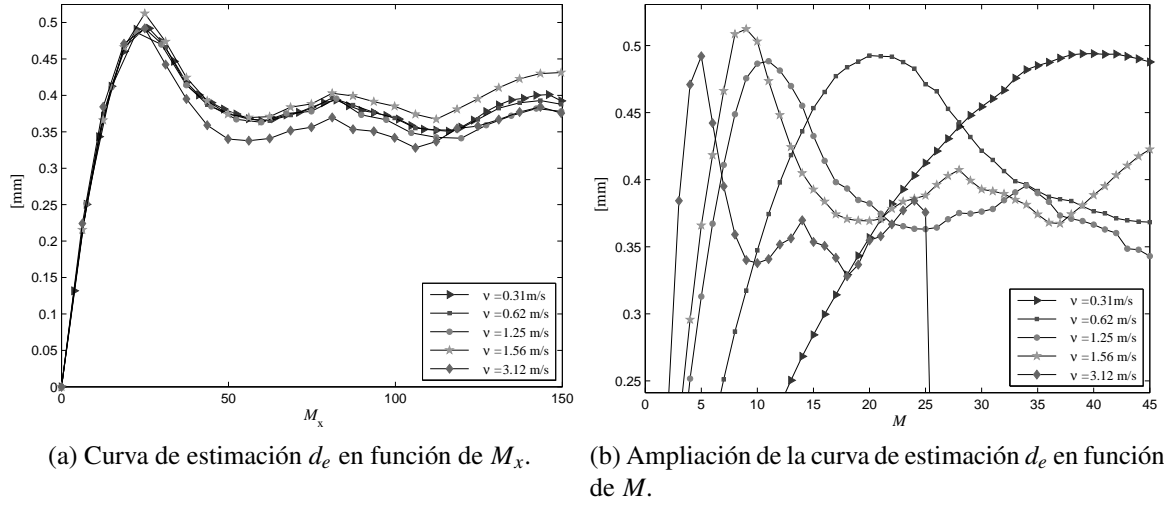


Figura 4.19: Comportamiento de la estimación de la pérdida de radio a diferentes velocidades de inspección.

$$s_{(n)} = s(niT_{PRF})$$

- ② Determinar el nuevo intervalo espacial de muestreo como:

$$\Delta x_{(n)} = n \nu T_{PRF}$$

siendo en este caso $\nu = 0.315\text{m/s}$ la velocidad registrada durante la inspección original (ver Tabla 4.5).

- ③ Convolucionar el nuevo vector $s_{(n)}$ con una ventana rectangular de amplitud unitaria $\mathbf{w}(M_x)$ y de anchura variable $M_x = 0 : 1 : 150\text{mm}$, para obtener las secuencias $d_k(M_x)$ de la siguiente manera:

```
for  $M_x = 0 : 1 : 150/\Delta x_{(n)}$ 
     $d_k(M_x) = s_{(n)} * \mathbf{w}(M_x)$ 
     $d_e(M_x) = \Delta x_{(n)} (|\text{máx}(d_k(M_x))| + |\text{mín}(d_k(M_x))|) / 2R$ 
end
```

- ④ Incrementar n y regresar al paso ①; hasta $n = 10$.

El efecto que se obtiene al diezmar la señal registrada con el factor $n = 1 : 10$ es elevar la velocidad de inspección hasta $\approx 3\text{m/s}$, donde el intervalo espacial de muestro alcanza un valor de $\Delta x = 6.23\text{mm}$.

La Figura 4.19a muestra las estimaciones de la pérdida de radio obtenidas para el mismo defecto a diferentes velocidades de inspección² donde se ha limitado el tamaño de la ventana de integración a un máximo de $M_x = 150\text{mm}$. Un resumen completo de todas las estimaciones obtenidas del procedimiento anterior se indican en la Tabla 4.6.

En la Figura 4.19a se observa que las máximas estimaciones de pérdida de radio se encuentran cuando la longitud de la ventana de integración M_x es próxima a la del plano inicial del defecto, tal como se observó en los ensayos anteriores. Sin embargo el tamaño de la ventana de integración en muestras M disminuye conforme aumenta la velocidad de inspección. La Figura 4.19b muestra con más detalle la región en torno a los máximos de las estimaciones d_e en función del tamaño de la ventana de integración M a diferentes velocidades.

Los errores cometidos en las estimaciones máximas respecto el valor real de la pérdida de radio no sobrepasan el 12 %, y tienden a disminuir cuando el tamaño de la ventana M es par ($n = 1, 2, 3$ y 8), mientras que para valores de M impares tienden a incrementarse, tal y como fue analizado en la Sección §3.1.2.

Las estimaciones medias de las pérdidas de radio $d_{e\text{mean}}$ tienden a disminuir cuando las velocidades son más elevadas. Por tanto los errores respecto al valor medio estimado tienden a aumentar, llegando a alcanzar valores próximos al 30 % cuando la inspección se realiza en torno a 3m/s. Este aumento en los errores relativos se debe a que la velocidad de circulación afecta directamente en la resolución del sistema incrementando el intervalo espacial de muestreo, por tanto la cantidad de muestras disponibles disminuyen. Como medida conservadora, es aconsejable optar por el valor máximo de d_P y d_N , en lugar del promedio. En este caso el error se reduce considerablemente, no superando el 12 % en ningún caso.

Con respecto a las estimaciones máximas de la longitud del plano inicial a diferentes velocidades, los valores se mantienen próximos al valor real con errores que no sobrepasan el 6 %. Por otra parte las longitudes medias también tienden a disminuir conforme aumenta la velocidad de inspección, y los errores que se comenten al considerar los valores medios no sobrepasan el 16 %.

Por tanto con el aumento en la velocidad de inspección se pierde resolución y los errores cometidos respecto a la estimación original de $d_{e\text{max}}$ aumenta del 8 % al 12 % en el peor de los casos, y en cuanto a la estimación $L_{e\text{max}}$ error se incrementa del 4 % al 6 %. Sin embargo la variación en los errores de estimación depende de la cantidad de muestras con las que se determina la irregularidad en s y que son abarcadas en la ventana de integración. En cualesquiera de los casos, considerando las estimaciones máximas obtenidas por el método heurístico propuesto, los

²Sólo se muestran curvas para algunas velocidades.

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
M	40	20	14	11	9	7	7	6	5	5
M_x [mm]	24.94	24.94	26.19	27.44	28.06	26.19	30.56	29.93	28.06	31.18
Velocidad [m/s]	0.31	0.62	0.94	1.25	1.56	1.87	2.18	2.49	2.80	3.12
Δx [mm]	0.62	1.24	1.87	2.49	3.11	3.74	4.36	4.98	5.61	6.23
$d_{e_{max}}$ [mm]	0.49	0.49	0.48	0.48	0.51	0.49	0.46	0.49	0.45	0.49
$\varepsilon(d_{e_{max}})$ %	7.39	7.06	5.21	6.15	11.38	7.92	-1.86	-0.24	-1.10	6.96
$d_{e_{mean}}$ [mm]	0.38	0.38	0.37	0.38	0.40	0.37	0.35	0.38	0.33	0.37
σ_{d_e} [mm]	0.031	0.032	0.035	0.033	0.034	0.042	0.035	0.028	0.052	0.038
$\varepsilon(d_{e_{mean}})$ %	-15.79	-16.05	-19.41	-17.49	-12.49	-18.39	-23.71	-17.83	-28.74	-20.16
$L_{e_{max}}$ [mm]	40.74	40.68	40.32	40.50	41.49	40.84	38.94	39.26	39.09	40.66
$\varepsilon(L_{e_{max}})$ %	3.68	3.51	2.61	3.07	5.57	3.92	-0.90	-0.08	-0.51	3.46
$L_{e_{mean}}$ [mm]	36.04	35.99	35.25	35.68	36.74	35.46	34.30	35.61	33.09	35.08
$\varepsilon(L_{e_{mean}})$ %	-8.27	-8.41	-10.29	-9.21	-6.49	-9.75	-12.72	-9.38	-15.79	-10.72

Tabla 4.6: Tabla comparativa de las estimaciones a diferentes velocidades de inspección.

errores en la determinación de d_e y L_e no superan el 12 % y 6 % respectivamente.

Por consiguiente conviene mantener una velocidad de inspección baja para estimar con una mejor resolución defectos pequeños (por debajo de 20mm), mientras que en los considerados críticos (superiores a 40mm) las estimaciones se mantienen muy próximas a los valores verdaderos con velocidades de hasta los 3m/s.

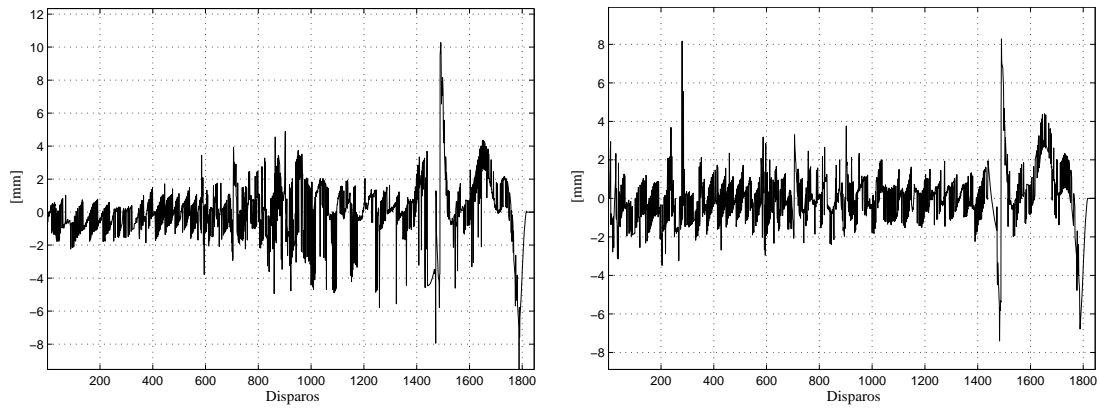
4.5.5. Consideraciones importantes

Si la amplitud del eco es suficientemente grande respecto al fondo de ruido, el método de medición sugerido en este trabajo proporciona una medida muy precisa del tiempo de vuelo $T_{Q(i)}$, con una resolución limitada por el periodo de un reloj maestro.

En la determinación de la señal de desplazamiento $s_{(i)}$ la señal de eco no interviene directamente, pero sí su posición. Entonces es importante reducir las interferencias que afectan directamente a la calidad de las señales capturadas, por tanto se debe considerar los siguientes ajustes:

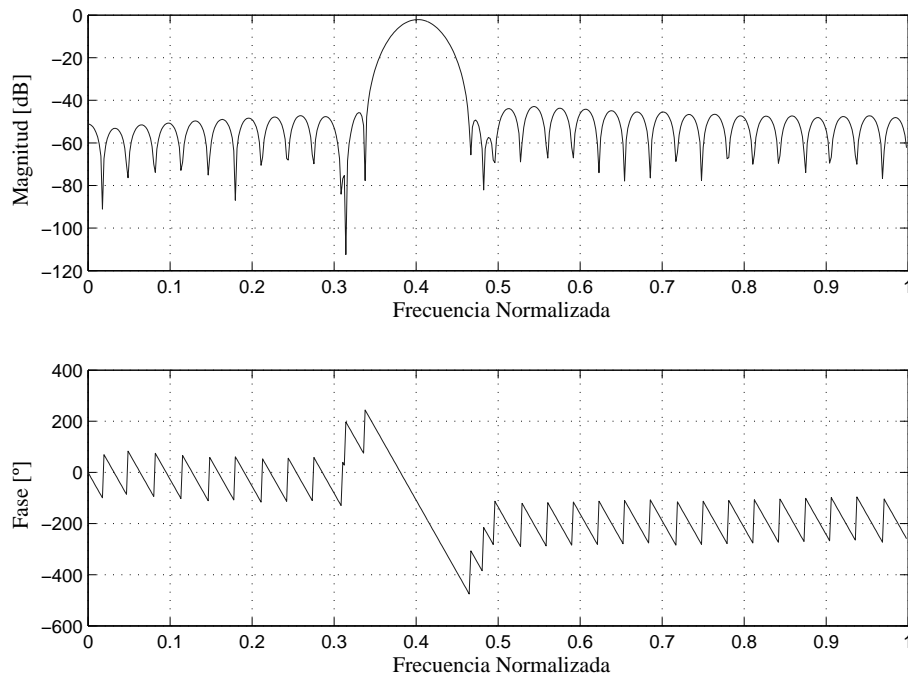
Selección del filtro

El ruido eléctrico y/o fenómenos electromagnéticos inducidos (EMI) desde el exterior contaminan la señal. Para reducir estas interferencias todas las señales capturadas por el sistema son



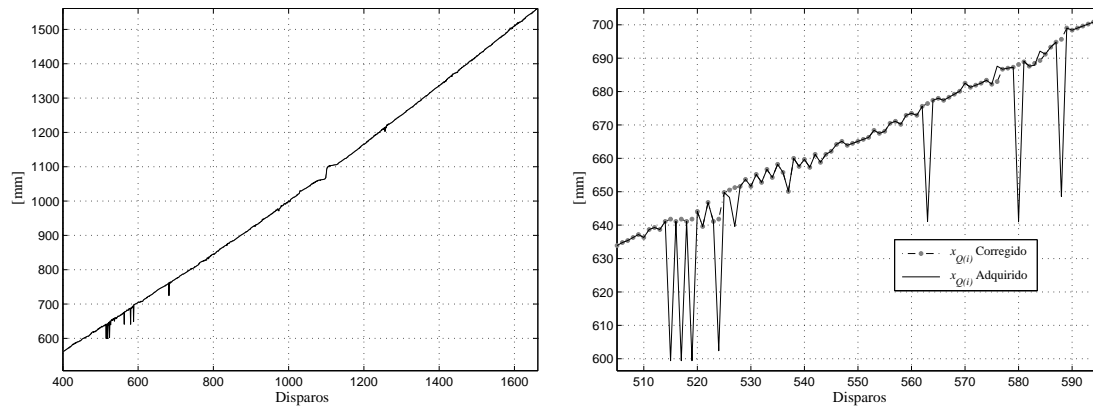
(a) Señal resultante de utilizar un filtro pasabanda de 100KHz.

(b) Señal resultante de utilizar un filtro pasabanda de 20KHz.



(c) Respuesta en frecuencia normalizada a la de Nyquist del filtro digital de 63 coeficientes.

Figura 4.20: (a) y (b) Comparación de la señal de desplazamiento s obtenida con filtros de 100KHz y 20KHz respectivamente, ambos centrados en 1MHz. (c) Respuesta en frecuencia del filtro pasabanda de 20KHz configurado en el hardware y utilizado en todos los ensayos.



(a) Posición medida de la rueda con zonas donde se pierde el eco de contacto.

(b) Posición del eco de contacto corregida en las zonas donde la señal es insuficiente.

Figura 4.21: La pérdida del eco de contacto produce alteraciones en la posición medida de la rueda sobre el carril.

procesadas en el filtro digital que ha sido incorporado al hardware. El filtro digital es programable, del tipo FIR simétrico de 63 coeficientes de 10 bits de ancho.

Para permitir sólo el paso de la frecuencia de emisión, es conveniente que la función utilizada en el filtrado sea de banda estrecha. Un ejemplo se observa en la Figura 4.20³, donde se muestra la señal de desplazamiento s obtenida de capturas diferentes procesadas con un filtro pasabanda de 100KHz (Figura 4.20a) y con otro de 20KHz, ambos filtros centrados en la frecuencia de emisión de 1MHz. Claramente se observa que la relación señal-ruido empeora con el uso de filtros de banda más ancha, sobre todo en el tramo final del carril donde la amplitud del eco es más débil.

La Figura 4.20c muestra la respuesta en frecuencia normalizada a la de Nyquist (2.5MHz) del filtro pasabanda de 20KHz de 63 coeficientes centrado en 1MHz y utilizado en todos los ensayos descritos anteriormente.

Pérdidas de contacto y niveles de umbral

Puede haber situaciones en las que el nivel de la señal sea insuficiente para la determinación de la posición del eco de contacto, por ejemplo pérdidas de contacto rueda-carril o por interferencias de manera destructiva con el ruido estructural.

En casos prácticos el umbral de validación A_U descrito en la sección §3.1.7 se ajusta al valor

³Obtenida del ensayo mostrado en la Figura 4.17

rms del ruido medido en todo el carril. Cuando la señal no supera este umbral, el algoritmo de seguimiento considera que la posición del eco de contacto está en el centro de la ventana de adquisición y el valor estimado de velocidad $v_{Q(i)}$ no se actualiza hasta que la señal tenga niveles mayores.

Un ejemplo de las pérdidas de contacto se muestra en la Figura 4.21a. El ensayo se realizó con una ventana de seguimiento de 12cm de largo, sobre la banda de rodadura se colocó material atenuante para simular suciedad. A pesar de las pérdidas de contacto, el algoritmo es capaz de seguir el movimiento de la rueda sobre el carril. En las zonas donde la señal no superó el nivel de umbral, la posición se corrigió estimando que la posición del eco se situaba en el centro de la ventana de adquisición (Figura 4.21b).

4.6. Discusión y conclusiones

Se describió brevemente la construcción del banco de ensayos que se utilizó para la verificación experimental de las bases teóricas desarrolladas en los capítulos anteriores. Asimismo se mencionaron los cambios que sufrió el carril de medición para lograr reducir los niveles de ruido estructural que presenta un carril ferroviario ordinario.

Se presentaron y compararon las adquisiciones sobre un mismo carril pero a diferentes frecuencias de emisión (0.5, 1, y 2.25MHz), concluyendo que la frecuencia de 1MHz era la apropiada para esta aplicación ya que presenta la mejor relación señal/ruido a la máxima distancia de inspección.

Se describió el diseño lógico realizado dentro de una FPGA para incorporar los algoritmos de seguimiento y de cancelación del ruido estructural. La arquitectura diseñada del sistema de ultrasonidos se auto-gestiona: emite pulsos, captura y evalúa los datos, determina automáticamente la presencia de una rueda sobre el carril para iniciar un ciclo de medición y también el momento de finalizarlo. Estas características incorporadas en el sistema eliminan la necesidad de emplear sensores adicionales, y reducen su complejidad.

Se confirmó la robustez del algoritmo de seguimiento empleando ventanas de capturas muy pequeñas (6cm) y con un movimiento no uniforme de la rueda, lo que supone una condición más desfavorable que la real donde la velocidad es prácticamente constante. Inclusive se comprobó su comportamiento en las situaciones de pérdida de contacto, demostrando una gran tolerancia.

Las señales adquiridas de ruedas reales de tren con defectos perfectamente identificados sobre la banda de rodadura fueron empleadas para evaluar las prestaciones de la nueva técnica de detección y medida. Los ensayos se efectuaron en diversas condiciones, ubicando los defectos en diversas regiones del carril y variando la velocidad a la que se ejecuta la inspección.

Todas las estimaciones de pérdida de radio y longitud del plano inicial obtenidas en los ensayos concuerdan con los valores reales medidos por perfilometría. Se observa un mínimo error relativo cuando las estimaciones son máximas, situación que ocurre cuando la longitud de la ventana de integración es próxima a la del defecto. Sin embargo cuando el defecto se ubica a la máxima distancia de inspección, los errores en las estimaciones tienden a incrementarse debido, principalmente, a la atenuación del pulso e interferencias con el ruido estructural del carril que dificultan la correcta determinación de la posición del eco.

Se observa además que las señales s contienen un cierto nivel de oscilaciones debido a la incertidumbre con la que se estima la posición del eco de contacto, y que se origina por un conjunto de factores: ruido estructural, modos de propagación del pulso a lo largo del carril, reverberaciones, ruido eléctrico, etc. La composición de estas indicaciones no tienen una distribución uniforme e influye de manera directa en la integración que se efectúa para estimar los defectos. Por tanto los defectos de menor tamaño (20mm) presentaran errores más elevados que los de mayor tamaño (40mm). Sin embargo en todos los ensayos el error en la estimación de la pérdida de radio no superó el 25 %, mientras que el de la longitud del plano inicial estimado no sobrepasó el 16 %.

La velocidad a la que se realiza la inspección influye en la resolución del sistema, aumentado el error en 4 % para las estimaciones de pérdida de radio y en un 2 % para las de las longitudes del plano inicial. Por tanto es conveniente realizar inspecciones a baja velocidad si se desea encontrar defectos pequeños (debajo de 20mm) con mayor precisión. En el caso de los considerados críticos (40mm) las estimaciones se mantienen muy próximas al valor verdadero con velocidades de hasta 3m/s.

Los resultados son repetitivos para cada defecto y en todas las estimaciones realizadas en diferentes condiciones, esto hace que la nueva técnica de medida y evaluación de defectos pueda considerarse robusta y suficientemente precisa para esta aplicación.

Conclusiones

Esta memoria de Tesis Doctoral ha presentado una técnica innovadora para la detección y medida de planos en ruedas de tren en condiciones dinámicas. Entre las innovaciones planteadas destacan:

- ✧ El sistema de medida es estático, con características constantes para todas las ruedas y estables en el tiempo. Sin embargo, la técnica de medida es dinámica, utilizando el propio movimiento del tren para efectuar las mediciones.
- ✧ Utiliza ondas ultrasónicas superficiales (de Rayleigh) pero, a diferencia de otras aproximaciones en las que éstas se envían por la periferia de la rueda, en este caso se transmiten por un carril de medida, analizando el eco producido por el contacto rueda-carril.
- ✧ Un único transductor monoelemento genera y recibe las señales desde múltiples distancias, en principio a lo largo de todo el desarrollo de la circunferencia de la rueda; para facilitar la inspección de ruedas montadas en bogies, se implementan dos subsistemas con una longitud de carril inferior al empate. La base tecnológica, por consiguiente, es de bajo coste y bien conocida.
- ✧ Es un método de medida directo, esto es, determina la flecha o pérdida de radio sufrida por abrasión en el momento en que se formó el plano original, con independencia del estado actual de desgaste del plano y banda de rodadura. No existe ninguna otra técnica con estas características.
- ✧ La inspección de todas las ruedas de un tren para detectar y cuantificar la presencia de planos en la banda de rodadura se efectúa en unos minutos a una baja velocidad de circulación para mejorar la resolución. Además, la presencia y dimensión de los defectos encontrados puede asociarse individualmente a cada rueda del tren, lo que facilita y acelera su diagnóstico y reparación por re-perfilado o sustitución.

- ✧ Se trata de una técnica de coste nulo, entendida en el sentido de tiempo de inspección, si el sistema de medida se ubica a la entrada de un taller de mantenimiento rutinario. Por este motivo, resulta adecuada para realizar un seguimiento histórico de la evolución de los defectos encontrados.
- ✧ La metodología propuesta para realizar las medidas en tiempo real efectúa:
 - a)_ una detección automática de la presencia de rueda sobre el carril de medida y
 - b)_ el seguimiento del eco de la rueda sobre el carril con una ventana de adquisición limitada a su entorno. De este modo se eliminan indicaciones espurias y ruido.
- ✧ Al mismo tiempo, el propio sistema de medida obtiene una estimación precisa de la velocidad de circulación del tren, que no necesita ser constante. Además puede determinar la velocidad de propagación de las ondas ultrasónicas en el carril de medida, midiendo el tiempo de vuelo a su extremo, compensando así posibles variaciones debidas a cambios térmicos y realizando un auto-calibrado y verificación del sistema.
- ✧ La técnica propuesta no necesita elementos auxiliares para determinar las variables requeridas para dimensionar automáticamente los defectos, conociendo el radio de la rueda: detección de presencia de rueda, velocidad de circulación y velocidad de propagación de las ondas ultrasónicas. De este modo permite definir sistemas completamente autónomos, sin demasiados requisitos medioambientales, con una mínima obra civil y totalmente automáticos.

Tales características distinguen la técnica propuesta de las existentes descritas en la literatura especializada cuyo análisis se realizó fundamentalmente en el primer capítulo de esta memoria.

En los capítulos anteriores se desarrollaron las **aportaciones** que fundamentan la técnica de medida propuesta y su validación por simulación y experimentalmente. Las más importantes son:

- ✧ El teorema de la pérdida de radio, que determina la flecha de un plano recién formado a partir de las mediciones del desplazamiento entre el punto de contacto rueda-carril y la proyección del centro de la rueda, cualesquiera que sea su nivel de desgaste o degeneración.
- ✧ Se demuestra que el desplazamiento del punto de contacto rueda-carril respecto a la proyección del centro de rueda sobre el carril, tiene un valor nulo en la zona de rodadura circular y presenta dos semiciclos, uno negativo y otro positivo, cuando la rueda circula sobre una irregularidad. La amplitud de la oscilación no está relacionada con la pérdida de material, pero sí su extensión, que se corresponde con la longitud del plano actual, y el área encerrada por dicho desplazamiento que lo hace con la pérdida de radio.

- ✧ Varios corolarios, derivados del teorema de la pérdida de radio, proporcionan una metodología robusta para determinar la flecha del plano nuevo (y, por tanto, su longitud por simple geometría) en condiciones de ruido intenso y para planos nuevos, desgastados o degenerados, cualesquiera sea el estado de la banda de rodadura de la rueda.
- ✧ El desplazamiento entre el punto de contacto rueda-carril se estima mediante medidas del tiempo de vuelo en ida y vuelta del pulso ultrasónico emitido desde el transductor. Puesto que se trata de una medida de tiempo, puede ser realizada con gran precisión. La amplitud del eco, que se ve influida por muchos factores, no interviene en la formulación, aunque la determinación de su posición está influenciada por la relación señal/ruido.
- ✧ La interferencia constructiva o destructiva de la débil señal de eco con el ruido de grano o con las indicaciones de otros modos de propagación en el carril de medida, produce cierto nivel de incertidumbre en la determinación de la posición del eco. Puesto que esta fuente de ruido es estática, se reducen sus efectos operando con trazas diferenciales. Tanto el seguimiento del eco de contacto como la medida de su posición se realizan con trazas diferenciales.
- ✧ A pesar de operar con trazas diferenciales, la interferencia del ruido estructural produce grandes variaciones de amplitud en el eco, con los consiguientes cambios de posición en función de la parte de la señal donde se produzca la interferencia constructiva o destructiva. Esta variación representa una incertidumbre en la determinación de la posición exacta de la posición del eco de la rueda, constituyendo la principal causa de error en la medida de la técnica propuesta.
- ✧ Al estimar la pérdida de material a partir de la integración de múltiples adquisiciones del desplazamiento del punto de contacto rueda-carril respecto a la proyección del centro de rueda sobre el carril, la estimación es muy robusta frente a las incertidumbres de posición del eco de contacto, siempre que su medida no esté sesgada (media nula).
- ✧ Se ha demostrado que el tamaño de la ventana de integración no es crítico para dimensionar planos aislados, cuya pérdida de material es desconocida *a priori*. La única limitación es que la longitud de la ventana de integración debe ser mayor o igual que la del plano actual en la banda de rodadura sin que haya un límite superior, por lo que la integral puede extenderse a toda la circunferencia de la rueda.
- ✧ Con frecuencia aparecen planos múltiples, donde se requiere que el tamaño de la ventana de integración sea mayor que el de un plano aislado, pero inferior a la distancia entre planos. Para abordar estos casos, la práctica ferroviaria puede determinar el valor más adecuado de la ventana de integración en función de ambos parámetros conocidos por experiencia.

- ✧ Además, se ha proporcionado un método automático que permite cuantificar la máxima irregularidad en la banda de rodadura con independencia del número y distancia entre planos. Este método utiliza múltiples ventanas de integración, de tamaños diferentes, cada una de ellas entregando un único valor representativo de uno o más planos aislados entre sí. El máximo del conjunto de los resultados obtenidos es una estimación fiable de la pérdida de material sufrida al crearse el plano de mayor tamaño, con independencia de la presencia de otros planos menores. Este método dimensiona automáticamente el mayor de los defectos y proporciona un parámetro de interés para eliminar todos los existentes en una operación de re-perfilado.
- ✧ La pérdida de material estimada es proporcional al periodo de muestreo espacial del eco de contacto rueda-carril, determinado por el producto de la velocidad de circulación del tren y el periodo de repetición de los pulsos ultrasónicos. Se ha desarrollado una técnica que permite realizar una buena estimación de la velocidad de circulación del tren, como el promedio de múltiples incrementos en el tiempo de vuelo multiplicado por una constante conocida.
- ✧ La estimación de la velocidad de circulación instantánea permite inferir la posición del eco de contacto rueda-carril en los casos en los que se producen pérdidas de señal, por interferencias o mal contacto, lo que facilita realizar correctamente el seguimiento del eco de la rueda con su desplazamiento.
- ✧ Los resultados teóricos anteriores han sido verificados, tanto por simulación, como experimentalmente en laboratorio. Dos planos, de 26 y 40mm de longitud inicial, con distinto nivel de desgaste, en ruedas diferentes, fueron evaluados en varias posiciones de los respectivos carriles de medida de forma que estuvieran sometidos a diferentes estados de interferencia con el ruido estructural. Asimismo, las medidas se repitieron para múltiples velocidades (hasta más de 3m/s) simuladas por diezmado de las capturas iniciales. En todos los casos se obtuvieron medidas muy próximas a los valores teóricos esperados.
- ✧ Al margen de los errores de medida propios de la técnica propuesta, existe una incertidumbre respecto al radio real de una rueda desgastada. Puesto que la medida de la flecha del plano nuevo es proporcional a esta magnitud, que puede variar hasta en un 10 %, se considera que ésta es una importante fuente de error externa al método.

5.1. Trabajo Futuro

Como en tantos otros casos el final de esta Tesis Doctoral no es más que el comienzo de una línea de investigación con nuevos retos y planteamientos. En esencia no es más que la constatación de que cada nuevo descubrimiento abre más interrogantes de los que resuelve.

En este trabajo se ha dado una solución innovadora y general a un problema concreto. Al terminar esta fase del trabajo de investigación se han abierto nuevas posibilidades, entre las que destacan:

- ✧ La posibilidad de utilizar la misma técnica para determinar otro parámetro geométrico importante de las ruedas de tren: su ovalidad. Ésta aparece en forma de lóbulos, con desviaciones de algunas décimas de milímetro respecto al radio nominal, que es preciso detectar, medir y corregir, particularmente para trenes de alta velocidad. En la actualidad la medida de la ovalidad se realiza con diversos medios, ópticos o mecánicos. Sería interesante continuar con la metodología descrita en este trabajo para esta aplicación.
- ✧ Otro aspecto también interesante, que requiere nuevos trabajos de investigación, es realizar el seguimiento de las dos ruedas de un bogie sobre el mismo carril de medida, evaluando simultáneamente ambos tiempos de vuelo (puede haber 0, 1 ó 2 ruedas simultáneas). Este resultado simplificaría la instalación (un único carril de medida por cada lado del tren) y eliminaría zonas ciegas. En principio este proceso es factible, pues sólo hay que realizar el seguimiento de una de las ruedas (la primera en entrar en el puesto de medida), y la siguiente avanza a cierta distancia a la misma velocidad; además, el sistema podría adaptarse al empuje automáticamente.
- ✧ La posibilidad de detectar otros defectos en la banda de rodadura, concretamente grietas, coqueas, excoiaciones, etc. En realidad el periodo de muestreo espacial supone la mayor limitación para la detección de estos defectos de menor extensión que los planos considerados críticos. A baja velocidad de circulación, aumenta la resolución y pueden detectarse, por ejemplo, coqueas de pocos milímetros de extensión. Sin embargo, aparentemente no hay forma de detectar grietas en sentido axial por este medio, ya que son extremadamente finas.

Hay, sin embargo, una posibilidad. Concretamente, el contacto rueda-carril actúa como una fuente de ultrasonidos prácticamente puntual y, por consiguiente, omnidireccional. Parte de esta energía se refleja hacia el transductor (que es la que se utiliza en la técnica propuesta), otra parte circulará por la superficie de rodadura de la rueda, en ambos sentidos y una última parte penetrará en la llanta. Se trata de señales extremadamente débiles y, por consiguiente, no es de esperar que produzcan indicaciones suficientes en un modo convencional.

Sin embargo, aprovechando una vez más el movimiento de la rueda sobre el carril, una grieta en la superficie de rodadura devolverá una débil señal de eco en múltiples disparos consecutivos. Esta señal irá acercándose progresivamente al eco de contacto con el carril para alejarse posteriormente. La búsqueda de esta señal en las proximidades del eco de contacto, puede proporcionar un método interesante de detección de grietas axiales, simultáneo al de la de planos y su cuantificación.

- ✧ Algunas facetas de la técnica descrita requieren un mayor esfuerzo investigador. Por ejemplo, no está resuelta la medida automática del radio de la rueda con los medios propios y se da por supuesto que es un dato facilitado por el usuario. En una extensión de la idea anterior, cabe esperar que, a una distancia equivalente al desarrollo de la rueda a partir del eco del punto de contacto, se produzca la señal que corresponde a la circulación completa por la periferia. En este caso dicha señal aparecerá de forma reiterada en disparos consecutivos y dentro de un intervalo temporal determinado por los radios mínimo y máximo, lo que puede facilitar su detección. Uno de los problemas a resolver radica en que el tiempo de vuelo de un pulso periférico debe encontrarse en la siguiente adquisición.
- ✧ Las anteriores posibilidades sólo pueden volverse reales con importantes mejoras en la relación señal/ruido y, particularmente, con los niveles de energía de la señal ultrasónica en el carril de medida para que pueda circular una onda superficial por la periferia de la rueda que produzca ecos detectables. Este aspecto demanda un análisis más cuidado de la geometría del carril de medida (quizás mediante técnicas de simulación de modos de propagación por elementos finitos) y del transductor. La electrónica desarrollada ha mostrado que los límites no residen en sus prestaciones.
- ✧ Por último, parece adecuada la aplicación de técnicas de fusión sensorial, donde la información proporcionada por este método de medida ultrasónica complementa a la de otros sistemas, como los basados en fuerzas y aceleraciones de impacto, sonido y vibraciones, ópticos o mecánicos, para dotar de mayor robustez y fiabilidad a las medidas realizadas.

Bibliografía

AAR.: «Association of American Railroads». Disponible en: <http://www.aar.org>.

ACKERMAN, N. A.: «Research Pay Off: Dynamic Wheel Load Detector Extends Life of Concrete Railroad Ties». *Informe técnico 128*, Transportation Research Board, TR News, Washington D.C., 1987. T.R.B. of the National Academies.

AEA.: «AEA Technology PLC». Disponible en: <http://www.aeat.co.uk>.

ALIOUANE, S.; HASSAM, M.; BADIDI BOUDA, A. y BENCHALA, A.: «Electromagnetic Acoustic Transducers (EMATs) Design Evaluation of their Performances». En: *Proceedings of the 15th World Congress on NDT*, WCNDT, Roma, Italia, 2000.

AMTAB.: «Advanced Measurement Technologies AB». Disponible en: <http://www.amtab.se>.

ANDERSON, D.: «Detecting flat wheel with a fiber-optic sensor». En: *Proceedings of JRC2006 Joint Rail Conference*, pp. 25–30. ASME/IEEE, Atlanta, USA, 2006.

ANTUNES, P.; ALMEIDA, P.; PINTO, J. y ANDRÉ, P.: «Fibre Bragg grating accelerometer for dynamic vibration measurement». PTEE, Delft, Holanda, 2007.

BAAS.: «Research & Development». Disponible en: <http://www.coenecoop.nl>.

BAEZA, L.; RODA, A.; CARBALLEIRA, J. y GINER, E.: «Railway Train-Track Dynamics for Wheel flats with Improved Contact Models». *Nonlinear Dynamics*, 2006a, **45**, pp. 385–397.

- BAEZA, L.; RODA, A. y NIELSEN, J.: «Railway vehicle/track interaction analysis using a modal substructuring approach». *Journal of Sound and Vibration*, 2006b, **293**, pp. 112–124.
- BEENAVISION SYSTEMS, INC.: «Machine vision technology in train monitoring and railroad industry». Disponible en: <http://www.beenavision.com>.
- BELOTTI, V.; CRENNNA, F. y ET. AL.: «Wavelet Signal Processing Applied to Railway Wheelflat Detection». En: *Proceedings, XVII IMEKO World Congress: Metrology in the 3rd Millennium*, pp. 1434–1437. IMEKO - International Measurement Confederation, Dubrovnik, Croacia, 2003.
- : «Wheel-flat diagnostic tool via wavelet transform». *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2006, **20(8)**, pp. 1953–1966. ISSN 0888-3270.
- BERNDT, D.: «System for detecting wheel-damage», 1988. US Patent No. 4 781 060 (1988).
- BRACCIALI, A. y CASCINI, G.: «A Wheelflat Detection Device Based On Cepstrum Analysis Of Rail Acceleration Measurements». En: *Proceedings of World Congress on Railway Research WCRR'97*, Vol.D, pp. 513–521. Florencia, Italia, 1997.
- BRACCIALI, A. y FOLGARAIT, P.: «New sensor for lateral & vertical wheel-rail forces measurements». En: *Conference on Railway Engineering*, London, UK, 2004.
- BRAY, D.; DALVI, N y FINCH, R.: «Ultrasonic Flaw Detection in Model Railway Wheels». *Ultrasonics*, 1973, **11(2)**, pp. 66–72.
- BREKKE, D.: «Wheel/Rail Profile Studies». En: *Proceedings of the 1996 ASME/IEEE Joint*, pp. 83–90. Railroad Conference, 1996.
- BRIZUELA, J.: *Detección de Defectos en Ruedas Ferroviarias Empleando Efecto Doppler*. Tesis de Maestría o Proyecto de Investigación, Universidad Nacional de Educación a Distancia y Universidad Complutense de Madrid, Departamento de Arquitectura de Computadores y Automática, Facultad de Ciencias Físicas, 2007.

- BRIZUELA, J.; IBÁÑEZ, A. y FRITSCH, C.: «Flaw detector for railway wheels by Doppler effect». En: *Proceedings of ICU 2009*, International Congress on Ultrasonics, Santiago de Chile, 2009.
- BRIZUELA, J.; IBÁÑEZ, A.; ; NEVADO, P. y FRITSCH, C.: «Railway wheels flat detector using Doppler effect». *Journal of Physics Procedia*, 2010, **3(1)**, pp. 811–817.
- BSNF: «BSNF - Burlington Northern Santa Fe Railway». Disponible en:
<http://www.bnsf.com>.
- BURKHARDT, M.; ROSSI, L. y BOLLER, M.: «Diffuse release of environmental hazards by railways». *Desalination*, 2007, **226**, pp. 106–113.
- C-LEC PLASTICS, INC.: «Rexolite® Information Page.» Disponible en:
<http://www.rexolite.com>.
- CAMACHO, J.; BRIZUELA, J. y FRITSCH, C.: «Grain noise reduction by phase coherence imaging». En: *Proceedings of the 36th Annual Review of Progress in Quantitative Non Destructive Evaluation (QNDE 2009)*, QNDE, Rhode Island, Estados Unidos, 2009a.
- CAMACHO, J.; BRIZUELA, J.; PARRILLA, M. y FRITSCH, C.: «Imagen ultrasónica por coherencia de fase para END». En: *Actas del VII CORENDE 2009*, AAENDE - Asociación Argentina de Ensayos No Destructivos y Estructurales, Rosario, Argentina. ISBN 978-987-23957-1, 2009b.
- CANNON, D.; EDEL, K.; GRASSIE, S. y SAWLEY, K.: «Rail defects: an overview». *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2003, **26(10)**, pp. 865 – 886.
- CASSIDY, P.: «A new material for the new century». *Railway Rolling Stock: Railtex International Railway Engineering Conference*, 2000, pp. 289–294.
- CHU, A.: «Specialized Sensors for Railroad Applications». *Sound and Vibration*, 2007, p. 12.
- CHUE, C. y CHUNG, H.: «Pitting formation under rolling contact». *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2000, **34**, pp. 1–9.

CORWAN, J. V.; CORWAN, G. G. y CORWAN, J. G.: «Method and apparatus for testing wear, size and residual stress conditions», 1976. US Patent No. 3 978 712 (1976).

CSIC: «Consejo Superior de Investigaciones Científicas». Disponible en:
<http://www.csic.es>.

DANNESKIOLD-SAMSØE, U.: «Apparatus for track-based detection of holes and flat spots in railway wheels», 1987. Pat. No. WO 87/062036 (1987).

—: «Apparatus for track-based detection of the wheel profile of passing railway wheels», 1990. US Patent No. 4 932 784 (1990).

DANNESKIOLD-SAMSØE, U.; GRAMTORP, J. y TORBEN MADSEN, A. H.: «Plant for track-based detection of the wheel profile of train wheels», 1993. US Patent No. 5 247 338 (1993).

DANO-RAIL: «Productos y Servicios para el Mantenimiento Ferroviario». Disponible en:
<http://www.dano-rail.com>.

DASEL SISTEMAS: «Equipos de Ultrasonido». Disponible en:
<http://www.daselsistemas.com>.

DAVIS, K.: «Matrox Imaging helps keep trains on the right track». *Industrial Focus*, 2001, pp. 194–195.

DE GRAAF, H.; DE JONG, E. y VAN DER HOEK, M.: «GOTCHA: Compact system for measuring train weight and wheel defects». En: *Proceedings of the Fourth International Conference on Weigh-in-Motion, ICWIM4*, Taipei, Taiwan, 2005.

DEDMON, S.; PILCH, J. y LONSDALE, C.: «Further Studies of Forged Wheel Steel High Temperature Properties for Improved Finite Element Analysis Simulations». En: *Proceedings of the JRC2006*, pp. 31–35. ASME - Joint Rail Conference, Atlanta, Georgia. ISBN 0-7918-4203-7, 2006.

DEUCE, R.: «Wheel Tread Damage - An Elementary Guide». *Informe técnico*, Bombardier Inc., 2007.

- DIEDRICH, R.: «Summary of the Forum discussion of NDT of railroad wheels at the German Bahn AG». *NDTnet*, 1998, **3(7)**. Disponible en:
<http://www.ndt.net/article/0798/forum/forum.htm> (accedido 08/10/2009).
- EALO, J.; SECO, F. y JIMENEZ, A.: «Broadband EMFi-Based Transducers for Ultrasonic Air Applications». *IEEE Trans. UFFC*, 2008, **55(4)**, pp. 919–929.
- EKBERG, A. y KABO, E.: «Fatigue of railway wheels and rails under rolling contact and thermal loading – an overview». *Wear*, 2005, **258(7-8)**, pp. 1288–1300. *Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems*.
- EKBERG, A.; KABO, E. y ET AL.: «Subsurface initiated rolling contact fatigue of railway wheels as generated by rail corrugation». *International Journal of Solids and Structures*, 2007, **44**, pp. 7975–7987.
- EKBERG, A. y MARAIS, J.: «Effects Of Imperfections on Fatigue Initiation in Railway Wheels». En: *Proceedings of the I MECH E Part F Journal of Rail and Rapid Transit*, volumen 214, pp. 45–54. Professional Engineering Publishing, 2000.
- ESVELD, C.: *Modern Railway Track*. 2nd Edition. Delft Univeristy of Technology, Holanda, 2001.
- ESVELD CONSULTING SERVICES: «Consultancy for Railway Track & Measurement». Disponible en: <http://www.esveld.com>.
- FAN, H. y JIA, H.: «Study on Automatic Testing of Treads of Running Railroad Wheels». En: *Proceedings of the 17th World Conference on Nondestructive Testing*, 17th WCNDT 2008, Shangai, China, 2008.
- FENG, Q.; CUI, J.; ZHAO, Y.; PI, Y. y TENG, Y.: «A dynamic and quantitative method for measuring wheel flats and abrasion of trains». En: *Proceedings of the 15th World Congress on NDT*, WCNDT, Roma, Italia, 2000.

- FRITSCH, C.; CAMACHO, J.; IBAÑEZ, A. y BRIZUELA, J.: «A Full Featured Ultrasound NDE System in a Standard FPGA». En: *Proceedings of the 9th European Conference on NDT, ECNDT*, Berlin, Alemania, 2006.
- FRITSCH, C.; CAMACHO, J. y PARRILLA, M.: «New ultrasound imaging techniques with phase coherence processing». *Ultrasonics*, 2010, **50**(2), pp. 122–126.
- GARCIA, J.; GARCIA, E. y ET AL.: «New Generation of Ultrasonic Inspection System for Train Wheels Incorporating Brake Discs», 2004. *Proceedings of the 16th World Conference on NDT*, Montreal, Canada.
- GARNHAM, J. y BEYNON, J.: «The early detection of rolling-sliding contact fatigue cracks». *Wear*, 1991, **144**, pp. 103–113.
- GORDON, J. y PERLMAN, B.: «Effects of Service Conditions on the As-Manufactured Residual Stress Distribution in Commuter Car Wheels». En: *Proceedings of the 13th International Wheelset Congress*, Roma, Italia, 2001.
- GOTCHA®: «Gotcha Monitoring System». Disponible en: www.gotchamonitoringsystems.com.
- GRASSIE, S.; SAXON, M. y SMITH, J.: «Measurement of Longitudinal Rail Irregularities and Criteria for Acceptable Grindings». *Journal of Sound and Vibration*, 1999, **227**(5), pp. 949–964.
- GRAU: «Track Maintenance Diagnostic Systems For Railway, Metro, and Trams». Disponible en: <http://www.graw.com>.
- GREENWOOD ENGINEERING: «High quality measuring equipment for the road and rail sector». Disponible en: <http://www.greenwood.dk>.
- GROSSE, M.; CERETTI, M. y OTTLINGER, P.: «Distribution of radial strain in a disc-braked railway wheel measured by neutron diffraction». *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, 2002, **74**, pp. 1400–1402.

- GUAGLIANO, M. y VERGANI, L.: «Experimental and numerical analysis of sub-surface cracks in railway wheels». *Engineering Fracture Mechanics*, 2005, **72(2)**, pp. 255–269.
- GULLERS, P.; ANDERSSON, L. y LUNDÉN, R.: «High-frequency vertical wheel-rail contact forces – Field measurements and influence of track irregularities». *Wear*, 2008, **265(9-10)**, pp. 1472–1478.
- GUSTAFSSON, M. G.: «Towards Adaptive Split Spectrum Processing». volumen 1, pp. 729–732, 1995.
- GUTAUSKAS, P.: «Railroad Flat Wheel Detectors», 1992. US Patent No. 5 133 521 (1992).
- HE, P.; YOU, Z. y TENG, S.: «Fast Algorithm of Flat Sliding Detection in Flat Wheel Detecting System». En: *Instrumentation and Measurement Technology Conference, IMTC 2005*, Ottawa, Canada, 2005.
- HESSER, P.; NOFFSINGER, J. y SHANAHAN, T.: «Precision Train Inspection Methods - North American Adoption of Global Technology». En: *Proceedings of the 2005 Communications and Signal Conference of the American Railway Engineering & Maintenance of Way Association (AREMA)*, General Electric Co., Illinois, USA, 2005.
- IBAÑEZ, A.; GOMEZ-ULLATE, L.; ANAYA, J. J. y ET AL.: «Installation for the automatic evaluation of the rolling band on wheels of moving trains», 2002a. US Patent No. 4 401 044 (2002).
- IBAÑEZ, A.; PARRILLA, M. y ET AL.: «Automatic In-Service System for Inspection of the Tread of Railway Wheels». En: *Proceedings of the 8th European Conference on NDT, ECNDT*, Barcelona, España, 2002b.
- : «Inspección Mediante Ultrasonidos de Ruedas de Tren en Operaciones de Mantenimiento». En: *Actas del V CORENDE 2005*, AAENDE - Asociación Argentina de Ensayos No Destructivos y Estructurales, Neuquén, Argentina. ISBN 987-1154-66-6, 2005.
- IMAGINE.: «Improved Methods for the Assessment of the Generic Impact of Noise in the Environment». Disponible en: <http://www.imagine-project.org>.

INTERLAB.: «Ingeniería Electrónica». Disponible en:

<http://www.interlab.es>.

ISHIZUKA, H.: «Probability of Improvement in Routine Inspection Work of Shinkansen Vehicle Axles». *Quarterly Report of RTRI*, 1999, **40(2)**, pp. 70–73.

ISO5948:1994: «ISO 5948 - Railway rolling stock material – Ultrasonic acceptance testing», 1994. International Organization for Standardization.

IWNICKI, S. D.: *Handbook of railway vehicle dynamics*. CRC Press, E.U.A., 2006. ISBN 0-8493-3321-0.

JAMES, G.: *Analysis of Traffic Load Effects on Railway Bridges*. Tesis doctoral, Royal Institute of Technology, 2003.

JERGÉUS, J.; ODENMARCK, C. y ET AL.: «Full-scale railway wheel flat experiments». *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F: Journal of Rail & Rapid Transit*, 1999, **213(1)**, pp. 1–13.

JOHANSSON, A.: «Out-of-round railway wheels – assessment of wheel tread irregularities in train traffic». *Journal of Sound and Vibration*, 2006, **293(3-5)**, pp. 795–806. Proceedings of the Eighth International Workshop on Railway Noise.

JOHANSSON, A. y NIELSEN, J.: «Out-of-Round Railway Wheels - Wheel-Rail Contact Forces and Track Response Derived from Field Tests and Numerical Simulations». *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F: Journal of Rail & Rapid Transit*, 2003, **217(F2)**, pp. 135–146.

KABO, E.: «Material defects in rolling contact fatigue - influence of overloads and defect clusters». *International Journal of Fatigue*, 2002, **24(8)**, pp. 887 – 894.

KABO, E. y EKBERG, A.: «Fatigue initiation in railway wheels – a numerical study of the influence of defects». *Wear*, 2002, **253(9)**, pp. 26–34.

- KALKER, J.; CANON, D. y ORRINGER, O.: *Rail Quality and Maintenance for Modern Railway Operation*. Kluwer Academic Publishers, Holanda, 1993. ISBN 0-7923-2263-0.
- KANG, B. y LEE, C.: «The Influences of the Wheel Profiles on the Wheel Wear and Vibrational Characteristics of the Passenger Cars Running on the Seoul-Pusan Conventional Line». *JSME International Journal*, 2004, **47(2)**, pp. 477–481.
- KAPPES, W.; KRÖNING, M. y ET AL.: «Non-destructive Testing of Wheel-Sets as a Contribution to Safety of Rail Traffic». Corende 2000, Mar del Plata, Argentina, 2000.
- KAPPES, W.; ROCKSTROH, B. y ET AL.: «Application of New Front-end Electronics for Non-Destructive Testing of Railroad Wheel Sets». En: *Proceedings of the 9th European Conference on NDT*, ECNDT, Berlin, Alemania, 2006.
- KAWAGUCHI, K.: «Development of WSP System for Freights Train», 2006. 7th World Congress on Railway Research.
- KENDERIAN, S.; DJORDJEVIC, B. B.; CERNIGLIA, D. y GARCIA, G.: «Dynamic railroad inspection using the laser-air hybrid ultrasonic technique». *Insight*, 2006, **48(6)**, pp. 336–341.
- KINO, G. S.: *Acoustic Waves: Devices, Imaging and Analog Signals Processing*. Prentice-Hall Signal Processing Series. Prentice-Hall, Inc., EUA, 1987. ISBN 0-1300-3047-3.
- KLOOW, L. y JENSTAV, M.: «High-Speed Train Operation», 2006. Transrail & Swedish Rail Administration (Banverket).
- KNOTHE, K.: «Some new aspects of 150 years of history of wheel/rail contact mechanics». En: *Symposium of Advances in Contact Mechanics: a tribute to Prof. J. J. Kalker*, Delft, Holanda, 2008.
- KRAUTKRÄMER, J. y KRAUTKRÄMER, H.: *Ultrasonic Testing of Materials*. Springer, E.U.A., 4^a edición, 1990. ISBN 3-5405-1231-4.
- KROENING, M.; SALZBURGER, J. y WAITE, F.: «Ultrasonic Test Device», 2002. US Patent No. 6 347 550 (2002).

- KUMAGAI, N.; ISHIKAWA, H. y HAGA, K.: «Factors of Wheel Flats Occurrence and Preventive Measures». *Wear*, 1991, **144**, pp. 277–287.
- KYOWA.: «Sensor System Solutions». Disponible en: <http://www.kyowa-ei.co.jp>.
- LEE, H.; COOPER, R.; WANG, K. y LIANG, H.: «Nano-Scale Characterization of a Piezoelectric Polymer (Polyvinylidene Difluoride, PVDF)». *Sensors*, 2008, **8(11)**, pp. 7359–7368.
- LEEDHAM, R. y NELSON, S.: «Wheel/Rail Profile Studies». En: *Proceedings of the 1995 ASME/IEEE Joint, Railroad Conference*, pp. 159–162. Railroad Conference, 1995.
- LEWIS, R.; BRAGHIN, F. y ET AL.: «Integrating Dynamics and Wear Modelling to Predict Railway Wheel Profile Evolution». En: *Proceedings of the 6th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems (CM2003)*, CM2003 - CHARMEC, Gothenburg, Suecia, 2003.
- LEWIS, R.; CAVALLETTI, M y ET AL.: «Railway wheel wear predictions with ADAMS/Rail». En: *Proceedings of the 1th MSC.ADAMS European User Conference*, MSC Software Ltd., London, UK, 2002.
- LEWIS, R.; DWYER-JOYCE, R y ET AL.: «Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems». En: *Proceedings of the 14th International Wheelset Congress*, Wheelset Congress, Orlando, USA, 2004a.
- LEWIS, R.; DWYER-JOYCE, R. y ET AL.: «A new CAE procedure for railway wheel tribological design». En: *14th International Wheelset Congress*, , 2004b.
- LIU, Y.; LIU, L. y MAHADEVAN, S.: «Analysis of subsurface crack propagation under rolling contact loading in railroad wheels using FEM». *Engineering Fracture Mechanics*, 2007, **74(17)**, pp. 2659 – 2674.
- LIU, Y.; STRATMAN, B. y MAHADEVAN, S.: «Fatigue crack initiation life prediction of railroad wheels». *International Journal of Fatigue*, 2006, **28(7)**, pp. 747–756.

LLOYD'S REGISTER RAIL.: «Lloyd's Register Transportation». Disponible en:

<http://www.lrrail.com>.

LONSDALE, C.; WAGNER, R.; TRAXLER, J. y MEYER, P.: «Phased array ultrasonic testing of new wrought railroad wheel rims», 2001. Standard Steel Railway Products, Burnham, Pennsylvania. Disponible en: www.standardsteel.com/rdpapers/2001pap.pdf (accedido 10/06/2006).

LONSDALE, C.: «An Analisis of Wheel Repair Data for a Coal Car Wheel», 2001. Standard Steel Railway Products, Burnham, Pennsylvania.

LONSDALE, C. y MEYER, P.: «Use of Phased Arrays For Ultrasonic Testing of Railroad Wheels», 2000. Standard Steel Railway Products, Burnham, Pennsylvania. Disponible en: <http://www.standardsteel.com/rdpapers/phasedarray.pdf> (accedido 23/03/2006).

LONSDALE, C. y STONE, D.: «Some Possible Alternatives for Longer-Life Locomotive Wheels». En: *Proceedings of IMECE02*, pp. 239–244. 2002 ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition, New Orleans, Louisiana. ISBN 0-7918-3752-1, 2002.

LORAM.: «Loram Maintenance of the Way, Inc.» Disponible en:

<http://http://www.loram.com>.

LYNCH, M.; MUTTON, P. y ET AL.: «Improving Wheelset Performance under High Axle Loads». En: *Proceedings of the 13th International Wheelset Congress*, Wheelset Congress, Roma, Italia, 2001.

LYON, D.: «The calculation of track forces due to dipped rail joints, wheel flats and rail welds». En: *Second ORE colloquium on Technical Computer Programs*, , 1972.

MADEJSKI, J.: «Automatic detection of flats on the rolling stock wheels». *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 2006, **16(1-2)**, pp. 160–163.

MAGEL, E.; KALOUSEK, J. y CALDWELL, R.: «A numerical simulation of wheel wear». *WEAR*, 2005, **258(7-8)**, pp. 1245–1254. Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems.

- MANABE, K.: «Verification of Wavelength-Fixing Mechanism for Rail Corrugation Caused by Multiple-Wheel Interaction». *Quarterly Report of RTRI*, 2007, **48(3)**, pp. 164–169.
- MARSHALL, M.; LEWIS, R.; DWYER-JOYCE, R y ET AL.: «Experimental Characterization of Wheel-Rail Contact Patch Evolution». *Journal of Tribology*, 2006, **128**, pp. 493–504.
- MATEOS, R.; BRIZUELA, J.; PARRILLA, M. y ET. AL: «An Ethernet-Based Ultrasound Signal Processor». En: *WISP2007 Proceedings*, IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing, Alcalá de Henaras, Spain, 2007.
- MATROX: «MATROX Imaging». Disponible en: <http://www.matrox.com>.
- MELLET, C.; LÉTOURNEAUX, F. y POISSON, F.: «High speed train noise emission: Latest investigation of the aerodynamic/rolling noise contribution». *Journal of Sound and Vibration*, 2006, **293(3-5)**, pp. 535–546.
- MEYER, P.; YETTER, K.; DRUCKENMILLER, M. y YETTER, C.: «Our experience with single crystal piezocomposite transducer materials». En: *Proceedings of the 16th World Conference on NDT*, WCNDT, Montreal, Canadá, 2004.
- MIAN, Z.: «Handheld Wheel Flaw Detection Device». *Informe técnico*, T.R.B. of the National Academies, Washignton D.C., 2004. Final Report for High Speed Rail Idea Project 39.
- MIAN, Z.; GAMACHE, R. y MACALLISTER, R.: «Contactless wheel measurement system and method», 2004. US Patent No. 6 768 551 (2004).
- MIAN, Z. y HUBIN, T.: «Method and system for contactless measurement of railroad wheels characteristics», 1997. US Patent No. 5 636 026 (1997).
- MOLINA SÁNCHEZ, BELEN: *Estudio de la Creación, Desarrollo y Método de Detacción de Grietas en Ruedas Ferroviarias*. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Superior de Ingenieros Industriales, 2006.
- NASA: «Derailed». *System Failure Case Sutdies of National Aeronautics and Space Administration*, 2007, **1(5)**.

- NDT SYSTEMS & SERVICES AG.: *Rail Wheel Inspection*. Fraunhofer IZFP and TEG, Alemania.
- NEWHOUSE, V. L.; BILGUTAY, N. M.; SANIIE, J. y FURGASON, E. S.: «Flaw-to-grain echo enhancement by split-spectrum processing». *Ultrasonics*, 1982, **20(2)**, pp. 59–68.
- NEWTON, S. G. y CLARK, R. A.: «An Investigation into the Dynamic Effects on the Track of Wheel flats on Railway Vehicles». *Journal of Mechanical Engineering*, 1979, **21(4)**, pp. 287–297.
- NICKS, S.: «Condition monitoring of the track/train interface». *The institution of Electrical Engineers*, 1998, pp. 711–716. IEE Seminar Condition Monitoring for Rail Transport Systems.
- NIELSEN, J.: «High-frequency vertical wheel-rail contact forces – Validation of a prediction model by field testing». *Wear*, 2008, **265(9-10)**, pp. 1465–1471.
- NOBLE, P.: «Railroad Car Wheel Measuring Apparatus», 1979. US Patent No. 4 155 526 (1979).
- OBRIG, H.; WITTKOPP, H. y EWALD, N. F.: «Method and apparatus for determining the diameter of rail vehicle wheels», 1989. US Patent No. 4 866 642 (1989).
- OLYMPUS.: «Inspection & Maintenance Systems». Disponible en:
<http://www.olympus-ims.com>.
- OPPENHEIM, A.; SCHAFER, R. y BUCK, J.: *Discrete-Time Signal Processing*. Prentice-Hall International, E.U.A., 2ª edición, 1999. ISBN 0-1375-4920-7.
- OTERO YUGAT, J.: «Study of rail vehicle dynamics in curved tracks». *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, 2009, **2(14)**, pp. 48–53.
- PAGANO, D. A. y GIRAGOSIAN, G. W.: «In-track wheel inspection system», 2009. US Patent No. 7 555 954 (2009).
- PARRILLA, M.; CAMACHO, J.; IBÁÑEZ, A.; FRITSCH, C.; NEVADO, P.; GÓMEZ-ULLATE, L.; BRIZUELA, J.; MARTÍNEZ, O. y VILLANUEVA, E.: «Sistema de Inspección Integral de Defectos en Ruedas Ferroviarias», 2006. Pat. 2006-032-38 (2006).

- PARRILLA, M.; NEVADO, P.; IBAÑEZ, A.; CAMACHO, J.; BRIZUELA, J. y FRITSCH, C.: «Ultrasonic Imaging of Solid Railway Wheels». En: *Proceedings of International Ultrasonics Symposium 2008*, IEEE IUS2008, Beijing, China, 2008.
- PIERINGER, A. y KROPP, W.: «A fast time-domain model for wheel/rail interaction demonstrated for the case of impact forces caused by wheel flats». En: *Acoustics'08 Proceedings*, pp. 2643–2648. EEA - European Acoustics Association, Paris, Francia, 2008.
- POHL, R.; ERHARD, A.; MONTAG, H. y WÜSTENBERG, H.: «NDT techniques for railroad wheel and gauge corner inspection». *NDT&E International*, 2004, **37**, pp. 89–94.
- PROROK, R.; KUZNIESKI, C. y KUCERA, W.: «Test apparatus for a railway wheel», 1999. US Patent No. 5 864 065 (1999).
- RAILWAY TECHNOLOGY:.. «The web for the railway industry». Disponible en: <http://www.railway-technology.com/contractors/training/ultrasonic>.
- REMENNIKOV, A. y KAEWUNRUEN, S.: «A review of loading conditions for railway track structures due to train and track vertical interaction». *Structural Control and Health Monitoring*, 2008, **15**, pp. 207–234.
- RENFE:.. «RENFE - Red Nacional de Ferrocarriles Españoles». Disponible en: <http://www.renfe.es>.
- ROCKSTROH, B.; KAPPES, W. y ET AL.: «Ultrasonic and Eddy-Current Inspection of Rail Wheels and Wheel Set Axles». En: *Proceedings of the 17th World Conference on Nondestructive Testing*, WCNDT, Shangai, China, 2008.
- ROCKSTROH, B.; WALTE, F. y ET AL.: «New Ultrasound Testing Systems for the Production Testing of Rail Wheels». En: *Proceedings of the 9th European Conference on NDT*, ECNDT, Berlin, Alemania, 2006.
- RODEMS, J.; CARNER, G. y MAGARI, P.: «Railway Wheel Sensors», 1992. US Patent No. 5 129 606 (1992).

- RONEY, M.: «State of the Art in Wheel/Rail Control – Highlights of the 1999 International Heavy Haul». En: *Proceedings of the AREMA 1999 Annual Conferences*, AREMA – The American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association, Chigago, Illinois, 1999.
- RSSB:GM/GN2497: «GM/GN2497 - Guidance on Railway Wheelset Tread, Gauging and Damage Identification», 2007. Railway Group Standards of Rail Safety and Standards Board Limited.
- SALIENT SYSTEMS INC.: «Intelligent track solutions». Disponible en:
<http://www.salientsystems.com>.
- SALZBURGER, H.; WANG, L. y GAO, X.: «In-motion Ultrasonic Testing of the Tread of High-Speed Railway Wheels using the Inspection System AUROPA III». En: *Proceedings of the 17th World Conference on Nondestructive Testing*, WCNDT, Shangai, China, 2008.
- SAMOKRUTOV, A.; BORROV, V.; SHEVALDYKIN, V. y KOZLOV, V.: «Features and Perspectives of Emats Use for Metal Objects Testing». En: *Proceedings of the 9th European Conference on NDT. Poster 202*, ECNDT, Berlin, Alemania, 2006.
- SCHUHMACHER, S.; MALY, H. y ETTLICH, R.: «Dynamic Inspection of High Speed Train Wheels». En: *Proceedings of the Railway Engineering 2004*, Londres, Inglaterra, 2004.
- SECO, M.; SANCHEZ, E. y VINOLAS, J.: «A time domain wheelflat/track FE model». En: *IET Railway Condition Monitoring Conference*, pp. 130–135. IET International Conference, Birmingham, Reino Unido, 2006.
- SHEVTSOV, I.; MARKINE, V. y ESVELD, C.: «Design of railway wheel profile taking into account rolling contact fatigue and wear». *Wear*, 2008, **265(9-10)**, pp. 1273–1282.
- SHEVTSOV, I.Y.: *Wheel/Rail Interface Optimisation*. Tesis doctoral, Section of Road and Railway Engineering, Faculty of Civil Engineering and Geosciences - Delft University of Technology, 2008.

- SHOOTER, ADRIAN: «News from the adhesion working group». *Gripping Stuff*, 2004, **17**, pp. 8–11.
- SHUBOCHKIN, A.: «Eddy-Current Testing of the Quality of Railway Wheels». *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2005, **41(3)**, pp. 189–192.
- SNYDER, T.; STONE, S. y KRISTAN, J.: «Wheel Flat and Out-Of-Round Formation and Growth». En: *Proceedings of the 2003 IEEE/ASME Joint Rail Conference*, pp. 143–148. ASME - American Society of Mechanical Engineers, Chicago, Illinois, 2003.
- STARMANS: «Starmans electronics s.r.o.» Disponible en:
<http://www.starmans.net/en/magnetic-particle-testing-of-railway-wheels.html>.
- STEENBERGEN, M.J.M.M.: *Wheel-rail interaction at short-wave irregularities*. Tesis doctoral, Delft University of Technology, 2008.
- STEFFENS, D.: *Identification and Development of a Model of Railway Track Dynamic Behaviour*. Tesis de Maestría o Proyecto de Investigación, Faculty of Built Environment and Engineering, Queensland University of Technology, 2005.
- STONE, D. y CARPENTER, G.: «Wheel thermal damage limits». *Railroad Conference, Proceedings of the 1994 ASME/IEEE Joint (in Conjunction with Area 1994 Annual Technical Conference)*, 1994, pp. 57–63.
- STRATMAN, B.; LIU, Y. y MAHADEVAN, S.: «Structural Health Monitoring of Railroad Wheels Using Wheel Impact Load Detectors». *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 2007, **7(3)**, pp. 218–225.
- SVET, F.: «Technique for the detection of flat wheels on railroad cars by acoustical measuring means», 1978. US Patent No. 4 129 276 (1978).
- SÁNCHEZ-REVUELTA, A. L. y GÓMEZ, C. J.: «Instalation and process for measuring rolling parameters by means of artificial vision on wheels of railway vehicles», 1998. US Patent No. 5 808 906 (1998).

SÁNCHEZ-REVUELTA, A. L.; NAVARRO, R. y GOMEZ, C. J.: «Rolling and lathing parameter measuring device by artificial viewing for railway vehicles wheels», 2003. European Patent No. EP 1 348 931 A2 (2003).

TALGO: «Patentes TALGO - Tren Articulado Ligero Goicoechea». Disponible en:
<http://www.talgo.es>.

TAM, H. Y.; LEE, T.; HO, S. L.; HABER, T.; GRAVER, T. y MÉNDEZ, A.: «Utilization of Fiber Optic Bragg Grating Sensing Systems for Health Monitoring in Railway Applications». pp. 1824–1832. IWSHM, Stanford, USA, 2007.

TEHRANI, P. H. y SAKET, M.: «Fatigue crack initiation life prediction of railroad». *Journal of Physics: Conference Series*, 2009, **181**, p. 012038 (8pp).

THANH, V.: «Wheel Deterioration», 2003. Railway Vehicle and Track System Integration, University of Birmingham & Manchester Metropolitan University.

THANH, V. y STIRLING, A.: «Interim Report on Condition Monitoring of Wheel and Rail», 2003. Railway Vehicle and Track System Integration, University of Birmingham & Manchester Metropolitan University.

THOMPSON, D. y JONES, C.: «A Review of the Modelling of Wheel/Rail Noise Generation». *Journal of Sound and Vibration*, 2000, **231**, pp. 519–536.

TILLMAN, L. y GLAZAR, A.: «Train Wheel Defect Detector», 1971. US Patent No. 3 558 876 (1971).

TITOV, S.; MAEV, R. y BOGACHENKOV, A.: «Measurements of velocity and attenuation of leaky waves using an ultrasonic array». *Ultrasonics*, 2006, **44(2)**, pp. 182–187.

TM: «Train Maintenance - Railway Technical Web Pages». Disponible en:
<http://www.railway-technical.com>.

TOKUDA, N. y ISHIGE, M.: «Structure of an Independent-wheel-system Bogie with a DDM and its Performance at High Speed». *Quarterly Report of RTRI*, 2008, **49(4)**, pp. 199–202.

- TSOMPANIDIS, I. y TSIKAKAS, V.: «Ultrasonic and Eddy current examination of railway rolling stock». En: *Proceedings of the 4th International Conference on NDT*, Hellenic Society of NDT, Chania, Grecia, 2007.
- UZZAL, R. U. A.; AHMED, W. y RAKHEJA, S.: «Dynamic Analysis of Railway Vehicle-Track Interactions Due to Wheel Flat With a Pitch-Plane Vehicle Model». *Journal of Mechanical Engineering*, 2008, **ME39(2)**, pp. 86–94.
- UZZAL, R. U. A.; STIHARU, I. y AHMED, W.: «Design and Analysis of MEMS based Accelerometer for Automatic Detection of Railway Wheel Flat». *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2009, **53**, pp. 947–955.
- VANAKI, H.: «Wheel Profile Sensor», 1998. US Patent No. 5 793 492 (1998).
- VASAIKAS, V.; Ž. BAZARAS y ČAPAS, V.: «Strength anisotropy of railway wheels under contact load». *Mechanika*, 2005, **51(1)**, pp. 31–38.
- VERHEIJEN, E.; ROOVERS, M. y VAN DEN BRINK, J.: «Statistical analysis of railway noise: track-side monitoring of individual trains». En: *Proceedings of the 9th International Workshop on Railway Noise*, IWRN, Munich, Alemania, 2007.
- VISION SYSTEMS.: «Vision Systems Design - Vision and Automation Solutions for Engineers and Integrators Worldwide». Disponible en:
<http://www.vision-systems.com>.
- VYAS, N. y GUPTA, A.: «Modeling Rail Wheel-Flat Dynamics». *Proceedings of the 1st World Congress on Engineering Asset Management*, 2006, pp. 1222 – 1231.
- WANG, B.; TAKATSUBO, J.; TOYAMA, N. y ZHAO, M.: «The Development of Laser Ultrasonic Visualization Equipment and its Application in Nondestructive Inspection». En: *Proceedings of the 17th World Conference on Nondestructive Testing*, WCNDT, Shanghai, China, 2008.

- WITTKOPP, H.; GRUTESER, H.; COENEN, W. y ELSCHENBROICH, W.: «Apparatus for monitoring and measuring the quality of rail wheel still mounted beneath a rail vehicle without directly contacting the rail wheels», 1989. US Patent No. 4 798 963 (1989).
- WOOH, S. C.: «Doppler-Based Airborne Ultrasound for Detecting Surface Discontinuities on a Moving Target». *Research in Nondestructive Evaluation*, 2000, **3(13)**, pp. 145–166.
- : «Flaw detection system using acoustic doppler effect», 2001. US Patent No. 6 324 912 (2001).
- WU, T. X. y THOMPSON, D.J.: *A Hybrid Model for Wheel/Track Dynamic Interaction and Noise Generation Due to Wheel Flats*. ISVR Technical Memorandum No. 859. University of Southampton, Institute of Sound & Vibration Research, 2001.
- : «A Hybrid Model for the Noise Generation Due to Railway Wheel Flats». *Journal of Sound Vibration*, 2002, **251(1)**, pp. 115–139.
- : «On the parametric excitation of the wheel/track system». *Journal of Sound Vibration*, 2004, **278(4-5)**, pp. 725–747.
- ZAKHAROV, S.: «Wheel/Rail Performance». *Guidelines to Best Practices for Heavy Haul Railway Operations: Wheel and Rail Issues*. International Heavy Haul Association: Virginia Beach, 2001, pp. 1–86.
- ZAKHAROV, S. y GORYACHEVA, I.: «Rolling contact fatigue defects in freight car wheels». *Wear*, 2005, **258(7-8)**, pp. 1142–1147. Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems.
- ZAKHAROV, S.; GORYACHEVA, I. y ET AL.: «Problems with wheel and rail profiles selection and optimization». *Wear*, 2008, **265(9-10)**, pp. 1266–1272. Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems - CM2006.
- ZAKHAROV, S.; KOMAROVSKY, I. y ZHAROV, I.: «Wheel flange/rail head wear simulation». *Wear*, 1998, **215(1-2)**, pp. 18–24.

ZERBST, U.; MÄDLER, K. y HINTZE, H.: «Fracture mechanics in railway applications – an overview». *Engineering Fracture Mechanics*, 2005, **72(2)**, pp. 163–194.

ZUREK, Z.: «Eddy-Current Testing of the Quality of Railway Wheels». *NDT & E International*, 2006, **39(8)**, pp. 675–679.

ÁLVAREZ RODRÍGUEZ, J.: *El Rodaje en el Ferrocarril*. Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, 2010. ISBN 978-84-934394-6-0.

Información del autor



Jose David Brizuela (Córdoba, Argentina - 1977 -) es Ingeniero en Electrónica por la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba (Argentina, 2002).

En 2005 inicia sus actividades de investigación en el antiguo Instituto de Automática Industrial (CSIC), donde adquiere los conocimientos en las técnicas de ultrasonido y diseño de hardware en FPGAs. En ese mismo año comienza, de manera simultánea, sus estudios de Doctorado en la Facultad de Ciencias Físicas perteneciente a la Universidad Complutense de Madrid y de Máster en Tecnologías de la Informa-

ción en Fabricación impartido por la Escuela Universitaria de Informática de la Universidad Politécnica de Madrid, titulación que la obtuvo en 2006.

Dentro de los trabajos desarrollados se destacan 3 patentes (ambas transferidas a empresas, dos a Dano-Rail y otra a Dasel, S.L.; las primeras, están relacionadas directamente con el ámbito ferroviario y última es la base tecnológica del desarrollo electrónico presentado en esta tesis), 3 artículos en revistas y 2 enviados y pendientes de publicación. Además ha participado en 13 comunicaciones a congresos, de los cuales 9 son internacionales. En 2009 recibió el premio al segundo mejor artículo en las Jornadas de Computación Reconfigurable y Aplicaciones.

Trabajos realizados

Patentes:

Dispositivo de inspección de la superficie de rodadura de ruedas de tren y método de detección de defectos en la rueda del tren con dicho dispositivo. Nro. de solicitud: P201001017. Inventores: J. Brizuela, C. Fritsch, A. Ibáñez, I. Ugarte, I. Gutiérrez, E. Villanueva, J. C. Liébana, M. Parrilla. Entidad titular: DANO RAIL. S.L. COOP.

Sistema de inspección integral de defectos en ruedas ferroviarias. Nro. de solicitud: 200603238. Inventores: M. Parrilla, J. Camacho, A. Ibáñez, C. Fritsch, J. Brizuela, P. Nevado, L. Gómez-Ullate, O. Martinez, E. Villanueva Martínez. Entidad titular: DANO RAIL. S.L. COOP.

Detector digital de defectos por ultrasonidos. Nro. de solicitud: 200601187. Inventores: C. Fritsch, A. Ibáñez, J. Camacho, J. Brizuela, J. C. Liébana Gallego, D. Videgaín, R. González, R. Giacchetta. Entidad titular: Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Empresa de explotación: DASEL, S.L.

Publicaciones:

Railway wheel flat detection and measurement by ultrasound, J. Brizuela, C. Fritsch, A. Ibáñez. NDT & E International Journal, 2010 (pendiente de publicación).

Railway wheel flat detection ultrasonic system, J. Brizuela, C. Fritsch, A. Ibáñez. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2010, (pendiente de publicación).

NDE system for railway wheel inspection in a standard FPGA, J. Brizuela, A. Ibáñez, C. Fritsch. Journal of Systems Architecture, Vol.56, pp. 616-622 (2010).

Railway wheel flat detector using Doppler effect, J. Brizuela, A. Ibáñez, P. Nevado, C. Fritsch. Physics Procedia, Vol.3, Nro.1, pp.811-817 (2010).

Grain-noise reduction by phase coherence imaging, J. Camacho, J. Brizuela, C. Fritsch. Rev. Progress in Quantitative Non Destructive Evaluation, Vol. 29, pp. 855-862 (2010).

Congresos:

Medida de planos en ruedas de tren en movimiento por ultrasonidos, J. Brizuela, C. Fritsch, A. Ibáñez. 41º Congreso Español de Acústica (Tecnacústica), León, España (2010).

Técnica ultrasónica para la detección de planos en ruedas de tren en Movimiento, J. Brizuela, A. Ibáñez, C. Fritsch. Congreso Regional de Ensayos No Destructivos y Estructuras (CORENDE), Rosario, Argentina (2009).

Imagen ultrasónica por coherencia de fase para END, J. Camacho, J. Brizuela, C. Fritsch. Congreso Regional de Ensayos No Destructivos y Estructuras (CORENDE), Rosario, Argentina (2009).

Railway wheel tread inspection by ultrasonic techniques, J. Brizuela, A. Ibáñez, C. Fritsch. Proc. IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS 2009), Roma, Italia (2009).

NDE system for railway wheel inspection in a standard FPGA, J. Brizuela, A. Ibáñez, C. Fritsch. IX Jornadas de Computación Reconfigurable y Aplicaciones (JCRA'09), Alcalá de Henares, España (2009). Premio: segundo mejor artículo.

Implementation of a modular sonograph in FPGAs, J. Camacho, J. Brizuela, C. Fritsch. IX Jornadas de Computación Reconfigurable y Aplicaciones (JCRA'09), Alcalá de Henares, España (2009).

Grain noise reduction by phase coherence imaging, J. Camacho, J. Brizuela, C. Fritsch. Proc. of 36th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation (QNDE), Rhode Island, EE. UU (2009).

Flaw detector for railway wheels by Doppler effect, J. Brizuela, A. Ibáñez, P. Nevado, C. Fritsch. International Congress on Ultrasonics (ICU 2009), Santiago de Chile, Chile (2009).

Ultrasonic imaging of solid railway wheels, M. Parrilla, P. Nevado, A. Ibáñez, J. Camacho, J. Brizuela, C. Fritsch. Proc. of 2008 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS 2008), Beijing, China (2008).

Dynamic focusing thorough arbitrary geometry interfaces, M. Parrilla, J. Brizuela, J. Camacho, A. Ibáñez, P. Nevado, C. Fritsch. Proc. of 2008 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS 2008), Beijing, China (2008).

An ethernet-based ultrasound signal processor, R. Mateos, J. Brizuela, M. Parrilla, A. Ibáñez, C. Fritsch. Proc. of 2007 International Symposium on Intelligent Signal Processing (WISP'07), Alcalá de Henares (2007).

END por ultrasonidos en ambientes ruidosos, C. Fritsch, J. Brizuela, D. Rodríguez, A. Ibáñez, R. Giacchetta. 11º Congreso Español de Ensayos No Destructivos, Gijón, España (2007).

A full featured ultrasound NDE System in a single FPGA, C. Fritsch, J. Camacho, A. Ibáñez, J. Brizuela, R. Giacchetta, R. González. Proc. of 9th NDT Conference (ECNDT), Berlín, Alemania (2006).